

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIEROS AMBIENTALES**

**TEMA:  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA  
LÁCTEA POR MÉTODOS DE OXIDACIÓN AVANZADA HETEROGÉNEOS DE  
FENTON, OZONIZACIÓN Y FOTO-FENTON A ESCALAS DE LABORATORIO**

**AUTORES:  
MARLON DAVID AGAMA RODRÍGUEZ  
BRYAN ENRIQUE CARRERA MARTÍNEZ**

**TUTOR:  
RENATO GABRIEL SÁNCHEZ PROAÑO**

**Quito, septiembre del 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Marlon David Agama Rodríguez, con documento de identificación N° 1724990773 y Bryan Enrique Carrera Martínez, con documento de identificación N° 1723211650, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA POR MÉTODOS DE OXIDACIÓN AVANZADA HETEROGÉNEOS DE FENTON, OZONIZACIÓN Y FOTO-FENTON A ESCALAS DE LABORATORIO**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIEROS AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Marlon David Agama Rodríguez  
172499077-3



---

Bryan Enrique Carrera Martínez  
172321165-0

Quito, septiembre 2021

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de investigación, **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA POR MÉTODOS DE OXIDACIÓN AVANZADA HETEROGÉNEOS DE FENTON, OZONIZACIÓN Y FOTO-FENTON A ESCALAS DE LABORATORIO** realizado por: Marlon David Agama Rodríguez y Bryan Enrique Carrera Martínez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre 2021



.....  
Renato Gabriel Sánchez Proaño

171554240-1

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema .....	1
1.2. Delimitación .....	2
1.3. Pregunta de investigación.....	2
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.5. Hipótesis.....	3
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	4
2.1. Industria láctea.....	4
2.1.1. <i>Consumo de agua en la industria láctea</i> .....	4
2.1.2. <i>Características de los efluentes lácteos</i> .....	6
2.1.3. <i>Impactos ambientales de la industria láctea</i> .....	8
2.1.3.1. <i>Emisiones a la atmósfera.</i> .....	8
2.1.3.2. <i>Generación de desechos.</i> .....	9
2.1.3.3. <i>Generación de efluentes.</i> .....	9
2.1.3.4. <i>Generación de ruido.</i> .....	10
2.2. Normativa ambiental vigente.....	10
2.3. Métodos de tratamiento de efluentes lácteos .....	13
2.3.1. <i>Métodos convencionales de tratamiento de efluentes lácteos</i> .....	14
2.3.2. <i>Procesos de oxidación avanzada</i> .....	15
2.3.2.1. <i>Proceso Fenton</i> .....	16
2.3.2.2. <i>Proceso Fotofenton</i> .....	17
2.3.2.3. <i>Proceso de Ozonización</i> .....	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1. Materiales .....	20
3.1.1. <i>Muestra</i> .....	21
3.2. Metodología.....	22
3.2.1. <i>Fase experimental</i> .....	22
3.2.1.1. <i>Muestreo del agua residual</i> .....	23
3.2.1.2. <i>Caracterización del agua residual.</i> .....	24
3.2.1.3. <i>Pretratamiento</i> .....	25
3.2.1.4. <i>Oxidación avanzada.</i> .....	27
3.2.2. <i>Análisis estadístico</i> .....	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30

4.1. Análisis inicial .....	30
4.1.1. <i>Parámetros fisicoquímicos de las muestras</i> .....	30
4.2. Método de análisis estadístico .....	31
4.2.1. <i>Caracterización de la muestra</i> .....	33
4.2.2. <i>Índice de biodegradabilidad</i> .....	34
4.2.3. <i>Precipitación Química</i> .....	34
4.2.4. <i>Oxidación avanzada</i> .....	37
4.2.4.1.    Fenton. ....	37
4.2.4.1.1. <i>Determinación de la concentración óptima del sulfato de hierro</i> .....	38
4.2.4.1.2. <i>Determinación de la concentración óptima del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30%</i> .....	39
4.2.4.1.3. <i>Tiempo óptimo de ozono</i> .....	40
4.2.4.1.4. <i>Tiempo óptimo de luz UV</i> .....	41
4.3. Ensayo 1 .....	41
4.4. Ensayo 2 .....	44
4.5. Comprobación del ensayo .....	47
4.6. Discusión .....	47
5. CONCLUSIONES Y REOMENDACIONES .....	48
5.1 Conclusiones .....	48
5.2 Recomendaciones .....	48
6. BIBLIOGRAFÍA .....	50
7. ANEXOS .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valoración cualitativa del consumo de agua en la industria láctea .....	6
<b>Tabla 2.</b> Concentraciones habituales de los diferentes tipos de vertidos dependiendo del producto que se fabrica .....	7
<b>Tabla 3.</b> Desechos generados en la industria láctea .....	9
<b>Tabla 4.</b> Límites de descarga a cuerpos de agua dulce.....	11
<b>Tabla 5.</b> Límites de descarga al sistema de alcantarillado público .....	12
<b>Tabla 6.</b> Materiales utilizados en el análisis de laboratorio.....	20
<b>Tabla 7.</b> Equipos empleados en la determinación de parámetros en el laboratorio .....	20
<b>Tabla 8.</b> Reactivos utilizados en los Procesos de Oxidación Avanzada .....	21
<b>Tabla 9.</b> Parámetros físicos, químicos, bacteriológicos y biológicos del agua residual .....	25
<b>Tabla 10.</b> Medición de pH, turbidez y DQO en las siete muestras tomadas .....	30
<b>Tabla 11.</b> Valores característicos de DQO en el muestreo .....	32
<b>Tabla 12.</b> Valores estadísticos para la selección de la muestra .....	32
<b>Tabla 13.</b> Parámetros fisicoquímicos de la muestra seleccionada .....	33
<b>Tabla 14.</b> Determinación del valor óptimo de coagulante: sulfato de aluminio .....	35
<b>Tabla 15.</b> Determinación del valor óptimo de coagulante: policloruro de Aluminio .....	35
<b>Tabla 16.</b> Disminución de la DQO distintas concentraciones de $\text{FeSO}_4$ .....	38
<b>Tabla 17.</b> Disminución de la DQO a distintas concentraciones de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	39
<b>Tabla 18.</b> Tiempo óptimo de aplicación de ozono .....	40
<b>Tabla 19.</b> Tiempo óptimo de aplicación de luz UV .....	41
<b>Tabla 20.</b> Variación de la DQO en el tratamiento biológico en el ensayo 1 .....	42
<b>Tabla 21.</b> Disminución de la DQO en el ensayo 1 .....	43
<b>Tabla 22.</b> Variación de la DQO en el tratamiento biológico en el ensayo 2 .....	44
<b>Tabla 23.</b> Disminución de la DQO en el ensayo 2.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.</b> Metodología aplicada para desarrollar el proyecto de investigación .....	22
<b>Figura 4.</b> Variación de DQO en las muestras .....	31
<b>Figura 5.</b> .....	32
<b>Figura 6.</b> Variación de la turbidez con sulfato de aluminio .....	35
<b>Figura 7.</b> .....	36
<b>Figura 8.</b> Óptimo de la concentración de $\text{FeSO}_4$ .....	38
<b>Figura 9.</b> Óptimo de la concentración de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	39
<b>Figura 10.</b> Disminución de la DQO respecto al tiempo de aplicación de lodos en el ensayo 1 .....	42
<b>Figura 11.</b> Eficiencia de los procesos en el ensayo 1 .....	43
<b>Figura 12.</b> Disminución de la DQO respecto al tiempo de aplicación de lodos en el ensayo 2 .....	45
<b>Figura 13.</b> .....	45
<b>Figura 15.</b> Medición de la DQO en el ensayo 2 .....	57
<b>Figura 14.</b> Medición de la $\text{DBO}_5$ , los frascos Winkler están en la incubadora a $20.2^\circ\text{C}$ .....	57
<b>Figura 16.</b> Tratamiento biológico con lodos.....	57
<b>Figura 17.</b> Prueba de jarras para determinar el valor óptimo de $\text{FeSO}_4$ y $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	57
<b>Figura 19.</b> Proceso de filtración con bomba al vacío para reducir sólidos.....	57
<b>Figura 18.</b> Proceso de ozonización en la muestra de agua residual láctea .....	57
<b>Figura 21.</b> Muestras preparadas para aplicar luz UV .....	58
<b>Figura 20.</b> Sedimentación de los flóculos después de realizar una prueba de jarras para determinar el valor óptimo del coagulante .....	58
<b>Figura 22.</b> Prueba de jarras para determinar los valores óptimos de los reactivos utilizados en Fenton.....	58
<b>Figura 23.</b> Proceso de ozonización .....	58
<b>Figura 24.</b> Pesaje de las diferentes concentraciones del $\text{FeSO}_4$ .....	58
<b>Figura 25.</b> Medición de detergentes en la muestra de agua residual .....	58

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Resultados obtenidos de las muestras analizadas en laboratorio de coliformes totales y fecales.....	55
<b>Anexo 2.</b> Resultados obtenidos de las muestras analizadas en laboratorio de nitrógeno total	56
<b>Anexo 3.</b> Fotografías tomadas en el laboratorio durante la realización de los POA's .....	57



## RESUMEN

La industria láctea en el Ecuador requiere grandes cantidades de agua, mismas que después del proceso de producción y al combinar con productos químicos necesarios para la limpieza, presentan un aumento drástico de materia orgánica, comprometiendo así los tratamientos convencionales; por lo cual resulta eficiente la aplicación de procesos de oxidación avanzada (POA's), caracterizados por generar radicales hidroxilos ( $OH\cdot$ ) como agentes oxidantes, que se encargan de oxidar la materia orgánica en el agua residual.

La siguiente investigación tiene como objetivo determinar el grado de contaminación de un efluente de la industria láctea en donde se elaboran productos y subproductos a base de leche. Para el análisis se realizó el muestreo en el mismo punto en 7 días. La fase experimental constó de tratamientos biológicos y químicos para disminuir la carga orgánica y llegar a límites máximos permisibles de descarga que establece la autoridad ambiental. Se realizó un pretratamiento al efluente para mejorar la eficiencia de los POA's. Se dejó sedimentar la muestra en conos Imhoff, después se realizó la coagulación-floculación con policloruro de aluminio, 2 min en mezcla rápida y 4 min a 20 rpm, se dejó reposar la muestra, y finalmente se filtró. Se realizaron dos ensayos aplicando procesos de oxidación avanzada en diferente orden.

El ensayo 1 se realizó en el siguiente orden de procesos: Fenton, tratamiento biológico, ozonización y luz UV; obteniendo una eficiencia del 97.3% en la disminución de DQO; mientras que en el ensayo 2 se realizó en el siguiente orden de procesos: tratamiento anaerobio, tratamiento biológico, Fenton, ozonización y UV con el que se obtuvo una eficiencia del 98.6% en la disminución de la DQO, teniendo en los dos ensayos cumplimiento con la normativa ambiental vigente.

**Palabras clave:** Industria Láctea, DQO, Fenton, Ozonización, luz UV, lodos activados

## ABSTRACT

The dairy industry in Ecuador requires large quantities of water, which after the production process and when combined with chemical products necessary for cleaning, presents a drastic increase in organic matter, thus compromising conventional treatments; therefore, the application of advanced oxidation processes (AOPs), characterized by generating hydroxyl radicals ( $\text{OH}^\cdot$ ) as oxidizing agents, which are responsible for oxidizing the organic matter in the wastewater, is efficient.

The following investigation aims to determine the degree of contamination of an effluent from the dairy industry where milk-based products and by-products are produced. For the analysis, sampling is carried out at the same point on different days. The experimental phase consists of biological and chemical treatments to reduce the organic load and reach the maximum permissible discharge limits established by the environmental authority. The effluent is pre-treated to improve the efficiency of the AOPs. The sample is left to settle in Imhoff cones, then coagulation and flocculation is performed with aluminum polychloride, 2 min in fast mixing and 4 min in slow mixing, the sample is left to settle, and finally it is filtered. Two tests are carried out applying advanced oxidation processes in different order.

In test 1, the following processes were used: Fenton, biological treatment, ozonation and UV light, obtaining an efficiency of 97.3% in the reduction of COD; while in test 2, the following processes were used: anaerobic treatment, biological treatment, Fenton, ozonation and UV, obtaining an efficiency of 98.6% in the reduction of COD, with both tests having the expected results that comply with current environmental regulations.

**Keywords:** Dairy, COD, Fenton, Ozonation, UV light, activated sludge

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Problema**

En Ecuador son considerados 3.5 millones de hectáreas dedicados para la producción de leche y sus derivados, esto se debe a que el producto forma parte de la canasta básica familiar (Real, 2013). La industria láctea ha crecido significativamente en los diferentes ámbitos, el sector lácteo es uno de los que más se ha desarrollado en los últimos años, con la elaboración de subproductos que se genera a partir de la leche, presentando una variedad de productos como: queso, yogurt, mantequilla, helados, etc. (Llanos, 2013).

Con el crecimiento de la industria láctea en el Ecuador la demanda de agua dulce ha aumentado, por lo tanto, el volumen de agua residual se ha visto en incremento, debido a esto la industria láctea se ha convertido en una de las principales fuentes generadoras de aguas residuales que en muchos de los casos no son correctamente tratadas o no son tratadas (Menéndez, 2018, p. 12). El centro de producción más limpia de Colombia indica que se necesita de 0.5 a 2.0 L de agua por cada litro de leche procesada (proceso, limpieza y sistemas de refrigeración) (Carpio, 2010, p. 2); también en Australia se ha determinado que para la producción de leche o sus derivados se necesita 0.7 a 2.9 litro de agua por litros de leche (Carpio, 2010, p. 5).

Para la elaboración de los productos y subproductos derivados de la leche en sus diferentes etapas, se generan efluentes que presentan una elevada demanda química y biológica de oxígeno, debido a los componentes principales que son: lípidos, carbohidratos y proteínas que le dan como característica alta carga orgánica entre 10-30g DQO/L en el agua residual, al ser descargados de forma directa a un cuerpo de agua, reduce drásticamente la concentración de oxígeno disuelto (OD) (Menéndez, 2018).

La industria láctea genera grandes cantidades de agua residual tanto por su volumen como carga orgánica (Menéndez, 2018), puede presentar aumentos drásticos del contenido

orgánico que dan lugar a la acumulación de bacterias filamentosas y comprometen el proceso de tratamiento biológico, es por eso que resulta eficiente la aplicación de un tratamiento adicional como es la oxidación avanzada (Villa, 2007). Estas técnicas tienen la capacidad de oxidar una gran variedad de contaminantes ya que su principal función está en la generación de radicales hidroxilos en cantidades necesarias para reaccionar con los compuestos orgánicos (REMTAVARES, 2008). La generación de radicales hidroxilos puede ser aumentada con la combinación de procesos heterogéneos (Monge, et al 2009).

El objeto de la investigación es determinar las tasas óptimas de oxidación avanzada para complementar el tratamiento biológico (lodos activados) en una industria láctea, a través de la caracterización del efluente en el laboratorio, para reducir el grado de contaminación que presenta el efluente, para cumplir con la normativa ambiental vigente para las descargas a cuerpos de agua y de esta forma reducir el grado de afectación al ecosistema.

## **1.2. Delimitación**

Las muestras utilizadas para la investigación son tomadas de una industria dedicada a la elaboración de la leche y sus derivados; ubicada en la zona norte del país.

## **1.3. Pregunta de investigación**

Para realizar este estudio se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuáles son las tasas óptimas de Fenton, ozonización y UV para disminuir la carga orgánica presente en efluentes lácteos?*

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Evaluar las tasas de degradación óptimas para la descontaminación de efluentes procedentes de la industria láctea por métodos de oxidación avanzada heterogéneas de Fenton, ozonificación y foto-fenton a escala de laboratorio.

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Caracterizar un efluente representativo de la industria láctea en el Ecuador, para analizar el grado de contaminación y su tratamiento.
- Evaluar la eficiencia de la descontaminación de las aguas residuales con alto contenido orgánico (DBO<sub>5</sub> y DQO) provenientes de la industria láctea, mediante sistemas de oxidación avanzada homogéneas a escala de laboratorio.
- Evaluar la eficiencia de la descontaminación de las aguas residuales con alto contenido orgánico (DBO<sub>5</sub> y DQO) provenientes de la industria láctea, mediante sistemas de oxidación avanzada heterogéneas a partir de las tasas de descontaminación homogéneas previamente obtenidas.

## **1.5. Hipótesis**

Se plantea una hipótesis la cual se va a comprobar o no con los resultados que se obtengan al finalizar los análisis: *La aplicación de las tasas óptimas en procesos de oxidación avanzada en efluentes lácteos hacen posible reducir la carga orgánica para llegar a la normativa ambiental vigente en el Ecuador.*

## **2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.1. Industria láctea**

La agroindustria está dividida en varios sectores, uno de ellos y de los más importantes es la industria láctea, ya que la leche y sus derivados son alimentos indispensables en la dieta diaria de un ser humano. Este subsector utiliza como materia prima a la leche, generalmente procedente de cabras, vacas y ovejas. Los subproductos elaborados a partir de la leche se conocen como lácteos y se los puede dividir en productos fermentados como el queso y el yogurt y no fermentados como los helados y la mantequilla (Condorchem Envitech, 2021).

Según Real (2013), en el Ecuador “se dedican 3,5 millones de hectáreas a la producción de leche; la mayor parte en la Sierra (75%), en segundo lugar, la Amazonía (11%) y la diferencia (14%) en la Costa y Galápagos” (pp. 2-4). Se puede considerar a esta industria como parte de la base económica para el desarrollo de un país, pero la contaminación que provoca es una preocupación a nivel mundial.

#### ***2.1.1. Consumo de agua en la industria láctea***

De todas las actividades industriales, la que presenta el mayor consumo de agua por cada unidad de producción es el sector de la alimentación, con la finalidad de mantener las condiciones higiénicas y sanitarias necesarias; por lo tanto, la industria alimentaria genera grandes cantidades de efluentes (Tikariha y Sahu, 2014).

La industria láctea es un ejemplo de este sector, debido al tipo de materia prima y tecnología de procesamiento que usan; la calidad de agua como efluente resulta altamente contaminada, en comparación al aire y suelo (Salou, 2016), el grado de contaminación va a depender del tipo de producción, la variedad de productos procesados y los productos que se usen para la limpieza.

Una de las características importantes de la industria láctea es el consumo abundante de agua, una parte en las diferentes etapas de producción como son: la pasteurización, homogeneización de la leche y la elaboración de diversos productos lácteos (Brião y Tavares, 2007, p. 488); otro gran porcentaje está destinado para la limpieza de tanques, intercambiadores de calor, homogeneizadores, silos, tuberías y otros equipos, a través de sistemas de limpieza como “Clean in place” (CIP).

CIP proporciona soluciones de limpieza por medio de bombas dosificadoras en el siguiente orden: primero el lavado con solución cáustica (hidróxido de sodio), seguido de un enjuague con agua, sigue otro lavado con solución ácida (puede ser ácido fosfórico o nítrico), se enjuaga con agua y finalmente se desinfecta con hipoclorito de sodio; todos estos productos químicos van a formar parte del agua residual, por lo cual esta puede contener desinfectantes, detergentes, materia orgánica, sales y bases dependiendo de la fuente (Tikariha y Sahu, 2014, pp. 16-17).

Estudios realizados han demostrado el alto consumo de agua en la industria láctea que produce entre 3 739 y 11 217 millones de m<sup>3</sup> de residuos por año, lo que genera de 1 a 3 veces más el volumen de leche procesada (Tikariha y Sahu, 2014, p. 16). Dependiendo del grado tecnológico de cada empresa, las pérdidas de leche están entre 10% y 20%; en el caso de una empresa completamente automatizada en la producción de leche y sus derivados se puede reducir las pérdidas al 2%. Según la Comisión Nacional de Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago de Chile (1998), una planta de lácteos consume en promedio de 1 a 2 litros de agua por litro de leche procesada, sin embargo, en la práctica se determina que los consumos de agua fluctúan entre 5 y 20 litro de agua por litro de leche procesada (Carpio, 2010). En la tabla 1 se indica una valoración cualitativa de agua en cada proceso productivo dentro de la industria láctea.

**Tabla 1.***Valoración cualitativa del consumo de agua en la industria láctea*

<b>Proceso productivo</b>	<b>Nivel de consumo</b>	<b>Operaciones con mayor consumo de agua</b>
Leche	Bajo	Tratamiento térmico y envasado
Nata y mantequilla	Bajo	Pasteurización de la nata y lavado de la mazada
Yogurt	Bajo	Operaciones auxiliares
Queso	Medio	Salado mediante salmueras
Operaciones auxiliares	Alto	Limpieza, desinfección, generación de vapor y refrigeración

*Nota:* Adaptado de: Condorchem Envitech (2021).

### **2.1.2. Características de los efluentes lácteos**

Los efluentes lácteos producidos son el aspecto ambiental más significativo de esta industria, debido a los grandes volúmenes generados a diario, así como también por la carga contaminante que representan para el ambiente de no ser tratados. La mayoría de agua que es utilizada dentro de la cadena de producción es convertida en efluente, esto es entre el 80 y 95% del total utilizado (Condorchem Envitech, 2021). Según Condorchem Envitech (2021), los procesos que más contribuyen en carga contaminante y volumen al efluente final son:

- Limpieza de equipos, instalaciones, CIP de limpieza de líneas, etc.
- Rechazos de los sistemas de ultrafiltración o sistemas de osmosis en el procesado de algún derivado.
- Limpieza de camiones transportadores de materia prima

Los efluentes generados en la industria láctea son similares en todas las empresas que se dedican a esta actividad productiva; según Condorchem Envitech (2021) su contenido generalmente es:

- Niveles altos de materia orgánica, debido a los componentes de la leche. La DQO media de las aguas residuales está entre 1000 y 6000 mg O<sub>2</sub>/l.



- Presencia de aceites y grasas, debido a la grasa de la leche.
- Niveles elevados de nitrógeno y fósforo, debido a los productos de limpieza y desinfección.
- Cambios significativos de pH, debido a los vertidos de soluciones ácidas y básicas. Variando entre valores de pH de 2 a 11, generalmente de las operaciones de limpieza.
- Conductividad elevada, debido al vertido de cloruro sódico procedente del salado del queso.
- Variaciones de temperatura (considerando las aguas de refrigeración).
- Las pérdidas de leche, contribuyen importantemente a la carga contaminante del efluente final. Un litro de leche entera equivale aproximadamente a una DBO<sub>5</sub> de 110000 mg O<sub>2</sub>/l y una DQO de 210000 mg O<sub>2</sub>/l.

Estos parámetros son los más comunes, sin embargo, depende el tipo de productos y subproductos que se vayan a fabricar dentro de la industria, según eso se pueden también tratar colorantes, saborizantes, conservantes, edulcorantes, coagulantes, entre otros.

Según Condorchem Envitech (2021) las industrias lácteas se las puede clasificar en dos categorías: de mono producto (caso más frecuente) y de varios productos, en la tabla 2 “se observan las concentraciones habituales de cada tipo de vertido en función del producto que se fabrica”. (p. 3)

**Tabla 2.**

*Concentraciones habituales de los diferentes tipos de vertidos dependiendo del producto que se fabrica*

Parámetro	Leche	Quesos	Derivados lácteos	Helados
pH	8.5	6.9	8.5	8
DQO (mg/l)	1 775	4 500	4 000	925
SS (mg/l)	435	850	825	425

<b>Parámetro</b>	<b>Leche</b>	<b>Quesos</b>	<b>Derivados lácteos</b>	<b>Helados</b>
Fósforo (mg/l)	20	35	6.25	5.5
NTK (mg/l)	65	100	100	75
Conductividad (μS/cm)	1 650	3 150	1 250	1 200
Cloruros (mg/l)	140	220	100	135
Nitratos (mg/l)	50	105	90	75
Aceites y grasas (mg/l)	105	365	110	25
Detergentes (mg/l)	3.5	7	7.5	6

*Nota:* Adaptado de: Condorchem Envitech (2021).

### **2.1.3. Impactos ambientales de la industria láctea**

La industria láctea es una actividad que relaciona la cría de ganado, tanto para la extracción de leche como para el consumo de carne, y a la industrialización de la leche y sus derivados (Ruiz, 2006, p. 37). Según El Telégrafo (2019) “En Ecuador se produce alrededor de 5 200 000 litros de leche diarios, el 20% se queda en las fincas, el 50% está destinado para la industria formal y el restante se comercializa en los mercados informales” (p. 12). “El 72% de la producción total se localiza en la Sierra, siendo Pichincha la provincia con mayor aporte según la Cámara de Agricultura, mientras que el menor aporte es de la provincia de Imbabura con el 2% de lo producción nacional” (Chambers, 2005, p. 25).

Los principales impactos ambientales que puede producir la industria láctea son: emisiones a la atmósfera, generación de desechos, generación de efluentes y generación de ruido.

#### **2.1.3.1. Emisiones a la atmósfera.**

Las emisiones al procesar la leche son dos, los gases de combustión que producen las calderas y el material particulado generado en la operación de la fábrica. El transporte de la materia prima y los productos ya procesados de la leche, también generan emisiones producidas por la combustión incompleta del diésel o la gasolina (Romero M. , 2009). Otra manera de

generar emisiones es por posibles fugas de refrigerantes en cuartos fríos y fugas en alimentadores en calderos o generadores (Prado, 2013, p. 31).

### **2.1.3.2. Generación de desechos.**

Los desechos generados en la industria láctea se los puede identificar acorde a la legislación ecuatoriana vigente, que regula el manejo y disposición final de desechos sólidos. En la tabla 3 se presentan los residuos que se generan en el proceso productivo y su respectiva característica.

**Tabla 3.**

*Desechos generados en la industria láctea*

<b>Residuo/Desecho</b>	<b>Origen</b>	<b>Características</b>
Papel, plástico, metal, etc.	Actividades varias	Residuo no peligroso
Madera y restos de pallets	Desembalaje	Residuo no peligroso
Grasas de depuradora	Depuración de aguas	Residuo no peligroso
Lodos de depuradora	Depuración de aguas	Residuo no peligroso
Aceites usados y grasas	Mantenimiento de Equipos	Residuo no peligroso
Aceites con piralenos	Trasformadores fuera de uso	Residuo no peligroso
Envases	Envases de residuos peligrosos	Residuo no peligroso
Restos de combustibles	Calderas	Residuo no peligroso
Baños de agua oxigenada	Esterilización de bobinas	Residuo no peligroso
Tintas con disolventes	Impresoras	Residuo no peligroso
Disolventes	Mantenimiento de maquinaria	Residuo no peligroso
Fluorescentes y lámpara de mercurio	Mantenimiento de instalaciones	Residuo no peligroso
Ácidos	Baterías y pilas agotadas	Residuo no peligroso

*Nota:* Tomado de: Menéndez (2018).

### **2.1.3.3. Generación de efluentes.**

El agua es el recurso más utilizado en el procesamiento de la leche; por tanto, las descargas líquidas representan el impacto ambiental más grave que enfrenta la industria láctea, el empleo de aditivos para la elaboración de sus diversos productos, la generación de suero y el uso de detergentes como es el ácido nítrico y sosa cáustica comúnmente utilizados para la

limpieza, desinfección e higienización contribuyen a la carga contaminante del efluente (Romero M. , 2009).

Debido a la naturaleza de la materia prima que tiene una DBO<sub>5</sub> de 110000 mg/l y DQO de 210000 mg/l (Menéndez, 2018) a los efluentes lácteos se caracterizan por elevada carga orgánica de sólidos suspendidos, nitrógeno amoniacal, grasas, fluctuaciones de pH y temperatura, todos estos parámetros deben ser controlados para cumplir con lo establecido en la norma de descarga de efluente (Prado, 2013, pp. 29-30).

#### **2.1.3.4. *Generación de ruido.***

El ruido en el procesamiento de la leche se genera en la puesta de marcha de los equipos, mismo que no ha presentado un impacto significativo externo; el ruido interno en el procesamiento con el correcto uso de normativas de seguridad industrial no implica un problema significativo (Prado, 2013).

## **2.2. Normativa ambiental vigente**

Las aguas residuales industriales son el resultado de algún tipo de proceso de producción, en el cual se da la elaboración o transformación de la materia prima. Las aguas residuales al provenir de las actividades industriales contienen una gran variedad de contaminantes, que al interactuar con los ecosistemas pueden alterarlo de diferentes formas; usualmente el impacto es negativo y más aún si no se les da un tratamiento adecuado (Vallejo, 2017, p. 7).

Entre los contaminantes principales se tiene la materia orgánica, grasas, metales pesados, cloruros, detergentes, sulfatos, coloides, entre otros. La mayoría de las veces estas aguas residuales no tienen ningún tratamiento previo que garantice que no van a generar impactos cuando sean vertidos en los cuerpos de agua; para esto la legislación ambiental ecuatoriana vigente exige el cumplimiento de ciertos parámetros para regularizar los vertidos

a los cuerpos de agua (Ministerio del Ambiente, 2015). En la tabla 4 se puede observar los valores máximos permitidos para los diferentes parámetros que se caracteriza en un agua residual cuando se descarga a cuerpos de agua dulce y en la tabla 5 el límite máximo permitido para cuando se descarga al alcantarillado público.

**Tabla 4.**

*Límites de descarga a cuerpos de agua dulce*

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	0,3
Aluminio	Al	mg/L	5
Arsénico total	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	2
Boro total	B	mg/L	2
Cadmio	Cd	mg/L	0,02
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/L	0,1
Cloro activo	Cl	mg/L	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo (ECC)	mg/L	0,1
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/L	1000
Cobre	Cu	mg/L	1
Cobalto	Co	mg/L	0,5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100mL	Remoción > al 99,9%
Color real	Color real	Unidades de color	*Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/L	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/L	0,5
DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub>	mg/L	100
DQO	DQO	mg/L	200
Estaño	Sn	mg/L	5
Fluoruros	F	mg/L	5
Fósforo total	P	mg/L	10
Hierro	Fe	mg/L	10
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/L	20
Materia flotante	Visible	mg/L	Ausencia
Manganeso	Mn	mg/L	2

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0,005
Níquel	Ni	mg/L	2
Nitrógeno amoniacal	N	mg/L	10
Nitrógeno Kjeldahl	N	mg/L	15
Compuestos orgánicos clorados	Organoclorados totales	mg/L	0.05
Organofosforados y carbamatos	Organofosforados totales	mg/L	0,1
Plata	Ag	mg/L	0,1
Plomo	Pb	mg/L	0,2
Potencial de hidrógeno	pH	mg/L	5-9
Selenio	Se	mg/L	0,1
Sólidos suspendidos totales		mg/L	**
Sólidos sedimentables		mg/L	100
Sólidos totales		mg/L	1600
Sulfatos	SO <sub>4</sub>	mg/L	1000
Temperatura	°C		< 35
Tensoactivos	Substancias activas al alcohol de metileno	mg/L	0,5
Turbidez		NTU	**
Zinc	Zn	mg/L	5

*Nota:* Adaptado de: Ministerio del Ambiente (2015).

**Tabla 5.**

*Límites de descarga al sistema de alcantarillado público*

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	100
Aluminio	Al	mg/L	5
Arsénico total	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	5
Cadmio	Cd	mg/L	0,02
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/L	0,1
Cloro activo	Cl	mg/L	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo (ECC)	mg/L	0,1
Cobre	Cu	mg/L	1

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Cobalto	Co	mg/L	0,5
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/L	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/L	0,5
DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub>	mg/L	250
DQO	DQO	mg/L	500
Fósforo total	P	mg/L	15
Hierro	Fe	mg/L	25
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/L	20
Materia flotante	Visible	mg/L	Ausencia
Manganeso	Mn	mg/L	10
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0,01
Níquel	Ni	mg/L	2
Nitrógeno Kjeldahl	N	mg/L	40
Plata	Ag	mg/L	0,5
Plomo	Pb	mg/L	0,5
Potencial de hidrógeno	pH	mg/L	5-9
Selenio	Se	mg/L	0,5
Sólidos suspendidos totales		mg/L	220
Sólidos sedimentables		mg/L	20
Sólidos totales		mg/L	1600
Sulfatos	SO <sub>4</sub>	mg/L	400
Temperatura	°C		< 40
Tensoactivos	Substancias activas al alcohol de metileno	mg/L	2
Turbidez		NTU	**
Zinc	Zn	mg/L	10

*Nota:* Adaptado de: Ministerio del Ambiente (2015).

### 2.3. Métodos de tratamiento de efluentes lácteos

“Una planta de tratamiento para efluentes lácteos tiene que ser diseñada principalmente para reducir los niveles contaminantes de parámetros tales como: DBO<sub>5</sub>, aceites y grasas, sólidos suspendidos, y para corregir el pH del efluente” (Condorchem Envitech, 2021, p. 8). A pesar de que los parámetros de vertido son muy variables, se puede establecer un sistema generalizado de control y pretratamiento para estas aguas residuales, para que se adapten a las

características de cada vertido. Esto sirve como referente para las empresas, pero cada una debe adaptar el sistema de tratamiento a sus necesidades y que se adecuen a los efluentes que generan (Condorchem Envitech, 2021).

“El tratamiento para estos efluentes se compone principalmente de: tratamiento primario para remover sólidos en suspensión, grasas y aceites y tratamiento secundario para remover materia orgánica disuelta y nutrientes (fósforo y nitrógeno)” (Soares et al, 2021, p 215). El tratamiento terciario se utiliza en algunos casos, para terminar de corregir los parámetros que aún no estén dentro de la norma.

### ***2.3.1. Métodos convencionales de tratamiento de efluentes lácteos***

El tratamiento primario causa la sedimentación primaria, en el que se separan los sólidos en suspensión a través de procesos que pueden ser físicos o físico-químicos. Este proceso consiste en “hacer pasar el efluente por un tanque en el que se separan los contaminantes por gravedad o mediante la adición de sustancias coagulantes, generando una corriente de efluente para ser tratado en el siguiente paso y lodo primario” (Soares et al, 2021).

En el tratamiento secundario, se utiliza a menudo los reactores biológicos para reducir la carga orgánica, principalmente la disuelta. “La degradación ocurre cuando el efluente entra en contacto con microorganismos, ya sea en un ambiente aeróbico o anaeróbico, donde se metaboliza la materia orgánica, alcanzando una reducción de hasta un 90% en la DBO” (Soares et al, 2021, p.150 ). En esta fase del tratamiento, la materia orgánica se elimina a través de la degradación biológica, utilizando tecnologías como filtros biológicos, lodos activados, estanques aireados o una combinación de estos.

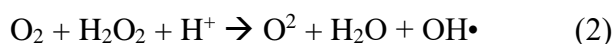
Las características de los efluentes lácteos impactan principalmente en los procesos biológicos, ya que aumenta considerablemente la demanda de oxígeno para la degradación aeróbica, causando que el tratamiento secundario consuma mucha energía (Soares et al, 2021).



### 2.3.2. *Procesos de oxidación avanzada*

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) se aplican principalmente en el tratamiento terciario, teniendo como objetivo “eliminar los compuestos difícilmente biodegradables e incluso disminuir la contaminación microbiológica” (CYTED, 2010, p 24). Las tecnologías de los POA tienen “capacidad de oxidar gran variedad de contaminantes, pudiendo llegar a la mineralización si el proceso se prolonga lo suficiente o quedándose en estados de oxidación intermedios que permitan un acoplamiento con otros métodos como pueden ser los procesos biológicos”. (CYTED, 2010, p. 25)

Los POA están basados en procesos fisicoquímicos que tienen la capacidad de producir cambios drásticos en la estructura química de los contaminantes, esto involucra la generación y uso de compuestos transitorios, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ). Estos radicales se generan a partir de agua oxigenada, oxígeno y catalizadores, por lo que los subproductos de reacción que se obtienen son dióxido de carbono y agua (CYTED, 2010). En las ecuaciones 1 y 2 se muestra la generación del radical hidroxilo:



“Este radical es efectivo para la oxidación de materia orgánica en condiciones suaves de presión y temperatura, hasta la mineralización completa. Debido a la reactividad es posible eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos logrando una reducción de DQO, COT y toxicidad” (CYTED, 2010, p. 25). Para poder acelerar la generación de radicales hidroxilo, se puede hacer una combinación con agentes oxidantes como ozono, radiación UV, peróxido de hidrógeno, catalizadores y sales de hierro. Los POA pueden clasificarse en función de la participación de la luz como procesos fotoquímicos y procesos no fotoquímicos.

### **2.3.2.1. *Proceso Fenton.***

Por primera vez el proceso de oxidación Fenton fue nombrada en el año de 1894 por Henry J. Fenton, cuando se descubrió que el peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) tenía la propiedad de activarse con iones ferrosos para oxidar el ácido tartárico; la combinación de una sal de hierro y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en un medio ácido que permite la formación de radicales OH y radicales perhidroxilo que posterior a esto se dan reacciones secuenciales que tiene como resultado la degradación de la materia oxidable (Basantes y García, 2020, p. 25)

Teniendo en cuenta que las cantidades de contaminantes que van a ser tratados por medio de una caracterización del efluente, los reactivos como el  $H_2O_2$  o iones de hierro no deben excederse en sus cantidades ya que pueden producir otras reacciones o disminuir la eficiencia de la reacción, en este caso es necesario determinar previamente los óptimos de cada reactivo mediante ensayos y aplicar el de mayor remoción de contaminantes o el que mayor cantidad de radicales hidroxilos produce ya que este ayuda a la remoción de la materia orgánica (Basantes y García, 2020, p. 27).

Según (Menéndez, 2018), el proceso de Fenton es uno de los tratamientos más comunes y con resultados efectivos, ya que el peróxido de hidrógeno con las sales de hierro son capaces de oxidar los compuestos orgánicos, es decir en presencia de materia orgánica este tipo de radicales son capaces de oxidarla de tal forma que se obtiene radicales ( $R'$ ) que son altamente reactivos; teniendo en cuenta que no todos los compuestos orgánicos tiene la misma velocidad de reacción con el radical (OH).

En el proceso Fenton es muy importante tener en cuenta el pH para que la reacción se de forma eficiente, se debe controlar que tenga un pH de 2.5 a 2.8 es decir una muestra ácida; esto se logra con ácidos como: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, entre los más utilizados ya que la muestra del efluente viene con un pH de alrededor de 4, tomando en cuenta que el éste proceso conlleva a un gasto muy alto ya en cantidades grandes de efluentes, y además de que

algunos reactivos son precursores y deben ser tratados basándose en normas para poder ser desechados y también guiándose en la parte legal para su adquisición (Sánchez y García, 2018, p. 105).

El proceso Fenton se desarrolla en condiciones de temperatura de 20°C, una presión atmosférica de 546 mm Hg (presión atmosférica de Quito), se da en condiciones ácidas del efluente a ser tratado (Sánchez y García, 2018, p. 10); de acuerdo con (Basantes y García, 2020, p. 10), la combinación de los reactivos para dar paso a la formación del proceso Fenton crea las siguientes reacciones:



#### ***2.3.2.2 Proceso Fotofenton.***

El tratamiento con luz ultravioleta se presenta como un método para evitar el uso de ozono y cloro en el tratamiento efluentes. La ventaja de utilizar este método es que no se genera subproductos en el proceso (Basantes y García, 2020).

“La excitación electrónica lleva, en la mayoría de los casos, a la ruptura homolítica de uniones químicas y puede producir la degradación de materia orgánica tanto en fase condensada como en gaseosa” (CYTED, 2010, p 23). El principal uso de la radiación UV es la fotólisis del agua que genera átomos de hidrógeno y radicales hidroxilo con “rendimientos cuánticos que dependen de la longitud de onda de irradiación” (CYTED, 2010, p 23).

#### ***2.3.2.3 Proceso de Ozonización.***

Según Soque (2019) el ozono fue descubierto por Schönbein en el año de 1839, el cual observó en el proceso de la electrólisis que se desarrollaba en el agua la formación de un gas que presentaba olor (O<sub>3</sub>), su primer uso comercial fue el ser utilizado como desinfectante para

el agua en Francia. Hoy en día es utilizado principalmente como agente descontaminante el cual controla y elimina la presencia de microorganismos en los alimentos.

Según REMTAVARES (2008) la ozonización se define como “proceso de oxidación que implica la generación de radicales hidroxilos en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio”. (p. 7)

El proceso de ozonización es comúnmente utilizado para el tratamiento de agua potable y/o residual, este proceso permite disminuir y en ciertos casos eliminar por completo los compuestos orgánicos e inorgánicos, del mismo modo reduciendo algunos de sus componentes como: TOC, olor, color, sabor y turbidez de las muestras que se tratan, adicionalmente a compuestos refractarios (REMTAVARES, 2008, p. 1).

El ozono es considerado como un POA de carácter homogéneo, considerado como el segundo oxidante más efectivo dentro del proceso de descontaminación, teniendo una subdivisión la cual consiste en dos mecanismos que son una reacción directa, la cual consiste en usar ozono molecular disuelto y la reacción indirecta que actúa con radicales que se forman cuando el ozono entra en contacto con el agua todo este proceso en condiciones alcalinas. También se puede considerar una combinación de los dos mecanismos para la remoción de sustancias presenten dentro de un efluente a ser tratado, su aplicación dependerá de la naturaleza que presente el agua como son el pH, Las dosis de ozono, entre otras (Grisales et al, 2011, p. 110).

El ozono es muy común en la utilización para la mineralización la cual consiste en la eliminación de carbono orgánico total (COT) de las moléculas orgánicas presentes, varios de estos procesos requieren de grandes cantidades de ozono lo cual lo hace un proceso caro en algunos casos (CYTED, 2010).

Es importante tomar en cuenta el flujo de gas y concentración del ozono sean los adecuados para la disminución de cada uno de los contaminantes presentes en el agua residual,

dentro de la medición de estos parámetros se puede encontrar que las cantidades de ozono a inyectar dentro del agua residual deben ser altas, para así tener una disminución apreciable de los diferentes contaminantes que se desean controlar y en algunos casos eliminar. Un factor clave para aplicar este proceso es el tiempo, existen tiempos óptimos para llegar a un máximo de descontaminación y llegar a un punto de saturación en donde ya no se podrá descontaminar más (Veliz et al, 2016, p. 67).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Materiales

Para la preservación y análisis de las muestras de agua residual se utilizan materiales indicados, basándose en la norma INEN 2169 para no alterar la naturaleza de las muestras. En la tabla 6 se enlistan los materiales utilizados para los procesos de análisis en el laboratorio, en la tabla 7 se presentan los equipos utilizados y en la tabla 8 los reactivos usados en los POA's:

**Tabla 6.**

*Materiales utilizados en el análisis de laboratorio*

Material	Tipo	Capacidad
Cono Imhoff	Plástico	1000 mL
Jeringa	Plástico	10 mL
Pipeta graduada	Vidrio	10 mL
Crisol	Porcelana	125 mL
Probeta graduada	Vidrio	1000 mL
Vaso de precipitación	Vidrio	1400 mL
Piseta	Plástico	500 mL
Botellas para DBO	Vidrio ámbar	500 mL
Desecador	Vidrio	14 L
Filtros	Papel	-
Propipeta	Plástico	-
Varilla de agitación	Vidrio	-
Espátula	Metálica	-
Pecera para lodos	Vidrio	-
Viales de DQO	Vidrio	-

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Tabla 7.**

*Equipos empleados en la determinación de parámetros en el laboratorio*

Equipo	Marca	Modelo
Oxímetro	METTLER TOLEDO	Seven2Go
Turbidímetro	ORBECO HELIGE	TB200

Equipo	Marca	Modelo
Potenciómetro y conductímetro	HORIBA LAQUA	F-74
Prueba de jarras	VELP Scientifica	JL6
Incubadora	SCP SCIENCE	QQB900
Balanza analítica	METTLER TOLEDO	ML-204
Estufa	BOEKEL	107905
Fotómetro	HANNA	HI 83099
Generador de ozono	A2ZOZone	MP-1000
Lámpara UV	Analytikjena	UVP UVL – 56
Aireador	JAD	S-2000
Bomba de filtración	HORIBA LAQUA	TX40
Mufla	THERMOLYNE	150678
Sensor DBO	VELP Scientifica	-

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Tabla 8.**

*Reactivos utilizados en los Procesos de Oxidación Avanzada*

Reactivo	Formula molecular	Pureza
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	60%
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98%
Hidróxido de sodio	NaOH	98%
Sulfato de aluminio	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	>99%
Policloruro de aluminio	Al <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl	>99%
Sulfato de hierro (III)	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	>62%
Peróxido de hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	30%
Agua desionizada	H <sub>2</sub> O	-

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

### 3.1.1. Muestra

Para realizar la caracterización del efluente se utilizó una muestra obtenida del homogeneizador, donde se mezclan las aguas residuales provenientes de los procesos de fabricación de la leche y sus derivados. Esta muestra es proveniente de una fábrica de lácteos ubicada en la zona norte del país.

### 3.2. Metodología

La metodología aplicada en la investigación está basada en cuatro procesos generales: muestreo, caracterización, pretratamiento y procesos de oxidación avanzada; como se muestra en la Figura 3 con el fin de cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente. Para determinar que esta metodología es la óptima se realizaron varios ensayos, cambiando el orden de los procesos.

**Figura 1.**

*Metodología aplicada para desarrollar el proyecto de investigación*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

#### 3.2.1. Fase experimental

Esta etapa es necesaria realizarla porque el estudio es realizado a nivel de laboratorio, con lo cual en esta fase se realizan dos actividades concretas: el muestreo de las aguas residuales y su caracterización, obteniendo valores de parámetros iniciales y definir los siguientes pasos con el fin de cumplir con los valores establecidos para la descarga del efluente al alcantarillado público.



### **3.2.1.1. Muestreo del agua residual.**

Para la toma de muestra se procede en base a lo que está descrito en el “Standard Methods”, las muestras son tomadas en recipientes plásticos con capacidad de 20 L para conseguir que sean muestras significativas para la investigación.

Teniendo en cuenta que los datos del muestreo deben ser válidos, hay que considerar el libro VI del TULSMA: Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua, además del Acuerdo Ministerial 061 para establecer los límites permisibles.

Lo que siempre se busca en las muestras tomadas es que se acerquen lo más posible a la realidad de descarga. Existen dos tipos de muestras: las muestras simples, que se toman una sola vez y en un sitio determinado; estas “representan las características del agua al instante del muestreo, pueden tener mucha variación con la realidad porque las características del agua varían con el tiempo, las actividades realizadas, etc.” (Molina, 2015, p. 15). Las muestras compuestas son usadas para conocer resultados promedio, “se toman varias muestras en distintos momentos y se colocan en el mismo recipiente o en recipientes individuales” (AGACE, 2018, p. 9), “tomando en cuenta que el intervalo de muestreo afecta, mientras más corto es más real la muestra” (Molina, 2015, p. 10).

Según Basantes y García (2020), el procedimiento de muestreo es el siguiente:

- Se organiza las botellas debidamente rotuladas, los reactivos, formatos e insumos.
- Una vez en el punto de muestreo, se identifica y solicita la colaboración necesaria para efectuar el muestreo.
- Se escribe con letra legible el nombre del responsable del muestreo.
- Una vez mezclados los volúmenes, se homogeniza el contenido del recipiente por agitación con un tubo plástico limpio y se procede al llenado de los recipientes.

### **3.2.1.2. Caracterización del agua residual.**

El procedimiento realizado en la caracterización está basado en lo establecido en la normativa vigente tomada del LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA, el establece en el capítulo II que:

“La caracterización de aguas residuales es el proceso destinado al conocimiento integral y estadísticamente confiable de las características del agua residual (doméstica e industrial) e integrado por la toma de muestras, medición de caudal e identificación de los componentes físicos, químicos, biológicos y microbiológicos”. (Ministerio del Ambiente, 2015, p. 22)

La caracterización del agua residual consta de dos actividades:

- *Homogeneización de la muestra:* es el proceso mediante el cual se mezcla uniformemente la muestra, se lo hace agitando el envase en el que este contenida el agua residual.
- *Medición de parámetros iniciales:* antes de realizar cualquier tipo de acción en lo que respecta al manejo de las aguas, es primordial que primero se conozcan las características del agua que se van a manejar como se muestra en la tabla 9. “Para poder tener una descripción precisa de los componentes, posibles contaminantes, y características fisicoquímicas de los efluentes residuales, es necesario realizar una caracterización en un laboratorio con certificación” (Basantes y García, 2020, p. 25).

**Tabla 9.***Parámetros físicos, químicos, bacteriológicos y biológicos del agua residual*

<b>Parámetros físicos</b>	<b>Parámetros químicos</b>	<b>Parámetros biológicos y bacteriológicos</b>
DQO		
COT		
pH		
Nitritos	Sólidos totales, suspendidos	Coliformes totales
Nitratos	volátiles, fijos sedimentables	Coliformes fecales
Nitrógeno Kjeldahl	Turbidez	DBO
Fósforo total		
Detergentes		

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

### **3.2.1.3. Pretratamiento.**

En esta etapa se realizan varias actividades como son:

*a. Sedimentación:* El procedimiento es el siguiente:

- Llenar con la muestra de agua residual el cono Imhoff hasta la marca de 1L
- Dejar sedimentar durante 48 horas
- Remover suavemente con una varilla de agitación los sólidos que se encuentran en las paredes del cono
- Dejar sedimentar durante 20 minutos más
- Registrar el volumen de sólidos sedimentables en unidades de mililitros por litro (ml/L)

*b. Filtración con bomba la vacío:* El procedimiento es el siguiente:

- Acoplar el equipo de filtración a la bomba
- Colocar el papel filtro de 20  $\mu\text{m}$
- Encender la bomba
- Colocar la muestra de agua residual que va a ser filtrada

- Cambiar de filtro cada vez que este se sature
- c. *Determinación de la concentración optima de coagulante:* los coagulantes que se utilizan para el proceso de coagulación – floculación son el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio (PAC), determinando como mejor coagulante el que presente menor valor de turbidez después del proceso. El procedimiento es el siguiente:
- Medir valores iniciales de pH y turbidez
  - Igualar el pH de la muestra a 7.5 agregando (NaOH)
  - Colocar 0.25 litros de agua residual en 6 vasos
  - Agregar el coagulante a cada vaso en diferentes cantidades: 50 mg/L, 120 mg/L, 200 mg/L, 250 mg/L, 350 mg/L y 500 mg/L respectivamente.
  - Mezclar durante 2 minutos a 120 revoluciones por minuto (rpm)
  - Dejar flocular durante 4 minutos a 20 rpm
  - Dejar que sedimente durante 30 minutos
  - Una vez realizada la prueba de jarras, tomar una muestra del sobrenadante y medir la turbidez
  - Determinar el coagulante y que concentración presenta el menor valor de turbidez
- d. *Coagulación - floculación:* El procedimiento que se sigue es el descrito en el literal c, en este caso se hace una relación de volumen de agua residual para determinar la cantidad de coagulante que se va a utilizar en 3 litros de agua.
- e. *Control de pH:* se lo realiza para disminuir el valor de pH de 8.0 a 2.8, añadiendo  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 96% de pureza.

#### 3.2.1.4 Oxidación avanzada.

- a. *Tratamiento biológico:* Para llevar a cabo este proceso se utilizan lodos activados provenientes de un centro de faenamiento ubicado en el cantón Quito. El procedimiento es el siguiente:
- Acoplar el sistema de aireación de microburbuja en la pecera
  - Colocar 2.5 litros de la muestra
  - Añadir 500 mL de lodos
  - Encender el sistema de aireación de microburbuja
  - Dejar aireando durante 5 días, tomando en cuenta que cada día se debe medir DQO y sólidos suspendidos, volátiles y fijos.
  - Sacar la muestra y colocarla en conos Imhoff para la sedimentación de sólidos
  - Extraer el sobrenadante
- b. *Control de pH:* se lo realiza para obtener un valor de pH de 2.8, añadiendo  $H_2SO_4$
- c. *Determinación del valor óptimo de  $H_2O_2$  y  $FeSO_4$ :* se debe determinar el valor óptimo de cada uno de los reactivos, para lo cual se debe hacer dos pruebas de jarras seguidas, siguiendo el procedimiento detallado a continuación:
- Colocar 0.25 litros de la muestra en 6 vasos
  - Agregar los reactivos a cada vaso en diferentes concentraciones: para el  $H_2O_2$ : 120 mg/L, 140 mg/L, 160 mg/L, 180 mg/L, 200 mg/L y 220 mg/L respectivamente y para el  $FeSO_4$ : 78 mg/L, 80 mg/L, 82 mg/L, 84 mg/L, 86 mg/L y 88 mg/L respectivamente
  - Mezcla rápida durante 2 minutos a 120 rpm
  - Mezcla lenta durante 4 minutos a 20 rpm
  - Dejar que sedimente durante 60 minutos
  - Una vez realizada la prueba de jarras, tomar una muestra del sobrenadante y medir la DQO

- Determinar con qué cantidad de los reactivos se obtiene el menor valor de DQO
- d. *Fenton*: El procedimiento es el mismo que se sigue en el literal c, con las concentraciones óptimas previamente determinadas de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{FeSO}_4$  en 1L de muestra (Sánchez y García, 2018)
- e. *Determinación del tiempo óptimo de ozonificación*:
- Colocar la muestra en una probeta de 1000 mL
  - Acoplar el equipo de ozonificación a la probeta
  - Encender el equipo con una concentración de  $14 \text{ g/cm}^3$  de  $\text{O}_3$
  - Tomar una muestra de agua en diferentes intervalos de tiempo: a los 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 180 min, 240 min
  - Medir la DQO de cada muestra
  - Determinar el tiempo de ozonificación en el cual se obtiene el menor valor de DQO
- f. *Ozonificación*: repetir el mismo procedimiento descrito en el literal e, pero utilizando con el tiempo óptimo de ozonificación
- g. *Determinación del tiempo de aplicación de luz UV*:
- Colocar la muestra de agua residual en un vaso de precipitación de 500 mL
  - Acoplar la lámpara de luz UV al vaso de precipitación
  - Encender la lámpara a 15 W
  - Tomar una muestra de agua en diferentes intervalos de tiempo: a los 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 240 min
  - Medir la DQO de cada muestra
  - Determinar el tiempo de aplicación de luz UV en el cual se obtiene el menor valor de DQO
- h. *Foto-fenton*: repetir el mismo procedimiento que en el literal g, pero utilizando el tiempo óptimo de aplicación de luz UV.

- i. *Medición de parámetros finales*: únicamente se mide DQO porque con este parámetro se puede determinar el grado de descontaminación que se obtuvo después de aplicar todos los procesos descritos en el agua residual.

### 3.2.2 *Análisis estadístico*

Para el procesamiento de los datos se utiliza el Método de Análisis A, donde Romero (2002), establece que se utiliza para un número de datos (n) menor de 20. El procedimiento es el siguiente:

- Se tabulan los datos en tres columnas
- En la primera columna se coloca el número de orden de cada dato (m), o número de posición dentro de la serie ascendente de los datos, comenzando con el número 1
- En la segunda columna se ordenan los datos, en orden ascendente de magnitud
- En la columna tres se calcula la frecuencia, probabilidad o porcentaje de ocurrencia del dato correspondiente, según la siguiente fórmula:

$$f = \frac{(m - 0.5)100}{n}$$

- Se realiza la recta de Henry sobre el papel normal de probabilidad, para graficar se toma el valor observado contra la probabilidad o frecuencia y se hace una regresión lineal de los datos mediante ajuste por mínimos cuadrados. Se puede aplicar parámetros estadísticos si los datos son ajustables a una recta con una buena correlación entonces la distribución es normal
- Se determina las características estadísticas de los datos, de acuerdo con la correlación obtenida

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis inicial

Para determinar la calidad del agua del efluente se analiza tres parámetros como es el pH, turbidez y DQO de 7 muestras, tomadas de la misma empresa láctea en 7 días, los resultados se expresan en la tabla 10.

**Tabla 10.**

*Medición de pH, turbidez y DQO en las siete muestras tomadas*

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
<b>pH</b>	3.8	3.65	2.87	3.77	3.57	3.06	3.45
<b>Turbidez (NTU)</b>	3989.2	4234	1458	1144	1347	987	1062
<b>DQO (mg/L)</b>	22566	21000	17230	14000	16800	11408	17968

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

En la Tabla 10 se determina los valores realizados en el muestreo de 7 días a la empresa láctea donde el agua residual en todas las muestras tiene un valor de pH ácido, la turbidez en la mayoría de las muestras sobrepasa los 1000 NTU y presentan alta carga orgánica.

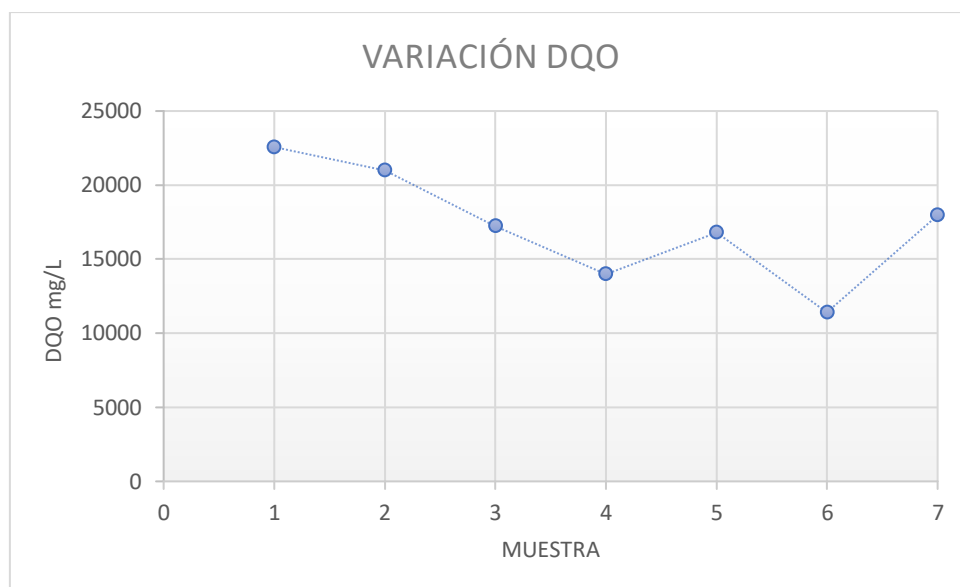
#### 4.1.1. Parámetros fisicoquímicos de las muestras

- *Variación de la DQO en las muestras*



**Figura 2.**

*Variación de DQO mg/L en las muestras*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

La variación que presenta la DQO durante el muestreo se debe a que la empresa láctea muestreada elabora diferentes productos cada día, por lo tanto, las muestras tomadas son de diferentes procesos.

El análisis estadístico está enfocado únicamente en la DQO, según (Sánchez y García, 2018) es importante para determinar el grado de contaminación en el agua residual.

#### **4.2. Método de análisis estadístico**

Mediante el análisis estadístico utilizando el método de Henry o método A, que asegura un nivel de confianza del 95% para el desarrollo de la investigación, se tabularon los datos obtenidos en el muestreo y se realiza la gráfica correspondiente, mostrando que la distribución es sesgada y no es normal, por tanto, el promedio geométrico se relaciona mejor con el promedio estadístico como indica (Romero A. , 2002).

Se utiliza los datos de la Tabla 10 para determinar la media aritmética, geométrica y desviación estándar, que se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

*Valores característicos de DQO en el muestreo*

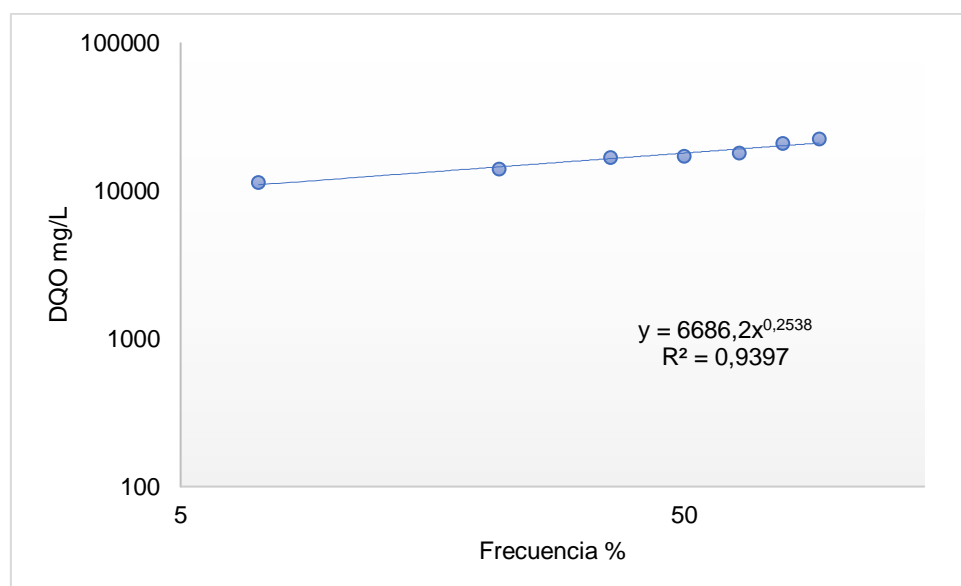
Muestra	DQO (mg/L)	f (%)
1	11408	7.14
2	14000	21.43
3	16800	35.71
4	17230	50
5	17968	64.29
6	21000	78.57
7	22566	92.86

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

Los datos de la Tabla 11 presentan una distribución Log normal, es decir, que los valores de concentración y carga de DQO, así como el caudal se ajustan mejor a una distribución Log normal, en la figura 5 se muestra la gráfica para los datos analizados

**Figura 3.**

*Análisis de datos Demanda Química de Oxígeno (DQO)*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

Al analizar los datos mediante la figura 5 se obtuvo un  $R^2$  de 0.939 indicando que el modelo se ajustó a los datos; según (Crow, 2005) define que al obtener un  $R^2 = 1$  explica toda la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su medida.

**Tabla 12.**

*Valores estadísticos para la selección de la muestra*

	Valor
<b>Media aritmética</b>	17281.71
<b>Media geométrica</b>	16899.44
<b>Desviación estándar</b>	3585.90

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

Para realizar los tratamientos al agua residual se elige la muestra con el valor de DQO más cercano a la media geométrica como recomienda (Sánchez y García, 2018), siendo esta la de mayor proximidad la muestra 5 que es de 16800 mg/L de la Tabla 10.

#### **4.2.1. Caracterización de la muestra**

**Tabla 13.**

*Parámetros fisicoquímicos de la muestra 5*

Parámetro	Unidades	Valor
<b>DQO</b>	mg/L	16800
<b>DBO</b>	mg/L	10800
<b>COT</b>	Mg/L	839000
<b>pH</b>	-	3.57
<b>Turbidez</b>	NTU	1347
<b>Nitrito</b>	mg/L	0.16
<b>Nitrato</b>	mg/L	0.11
<b>Nitrógeno Kjeldahl</b>	% (N)	0,037
<b>Fósforo total</b>	mg/L	48
<b>Sólidos suspendidos</b>	mg/L	40
<b>Sólidos volátiles</b>	mg/L	10.61
<b>Sólidos fijos</b>	mg/L	4.46
<b>Sólidos Totales</b>	mg/L	15.07
<b>Detergentes</b>	mg/L	17

Parámetro	Unidades	Valor
Coliformes totales	NMP/100 mL	<1
Coliformes fecales	NMP/100 mL	<1

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

Para los diferentes análisis es necesario determinar las características del efluente, principalmente para calcular la biodegradabilidad es indispensable conocer los valores de DQO y DBO; mientras que para realizar un tratamiento biológico se debe determinar los nutrientes a través de nitrato, nitrato y fosforo, los demás parámetros ayudan a verificar la eficiencia del tratamiento en sus diferentes etapas, las características del efluente muestra parámetros que no cumplen con la normativa ambiental vigente como indica (Ministerio del Ambiente, 2015), para descargar a un cuerpo de agua.

#### **4.2.2. Índice de biodegradabilidad**

$$DBO_5/DQO = 10800/1600 = 0.6$$

El índice de biodegradabilidad, nos indica que el agua residual es altamente degradable (Sánchez y García, 2018), lo recomendable sería realizar un tratamiento biológico, pero al presentar una alta carga orgánica este tratamiento se vería afectado, por lo tanto, se lo complementa con un tratamiento basado en los POA's.

#### **4.2.3. Precipitación Química**

Para realizar este proceso se tomó en cuenta dos tipos de reactivos que tienen el mismo objetivo, que es remover los sólidos suspendidos de la muestra, se utilizó  $Al_2(SO_4)_3$  y policloruro de aluminio en la prueba de jarras, durante el proceso con los dos reactivos se pudo determinar el mismo resultado, con distintas eficiencias al disminuir el valor de turbidez; a continuación, se expresa los resultados en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14.**

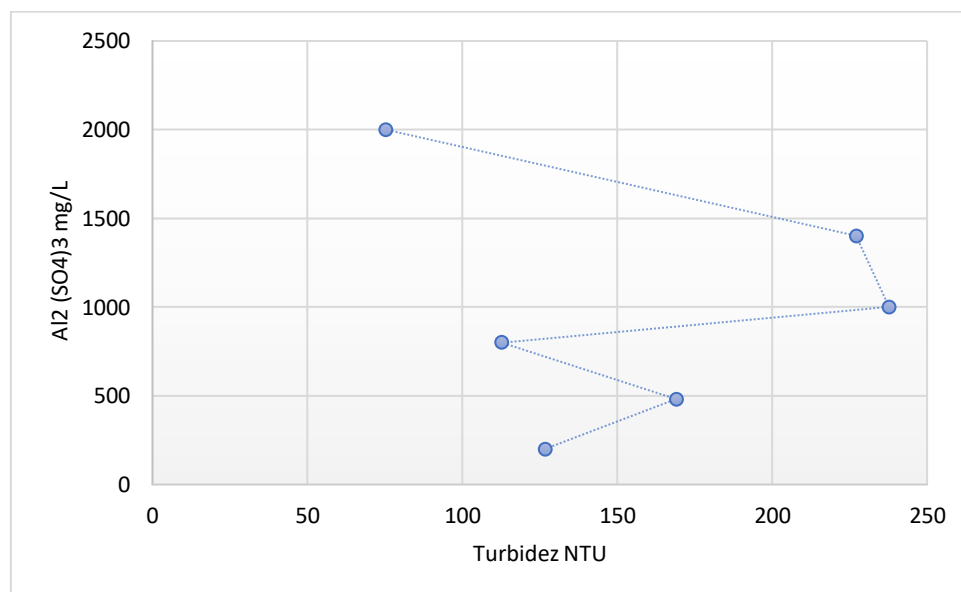
*Determinación del valor óptimo de coagulante:  $Al_2(SO_4)_3$*

Muestra	$Al_2(SO_4)_3$	Turbidez
	mg/L	NTU
1	200	176.7
2	480	209.1
3	800	162.7
4	1000	287.7
5	1400	277.1
6	2000	125.3

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 4.**

*Variación de la turbidez con  $Al_2(SO_4)_3$*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

La figura 6 muestra que no hay una tendencia lineal en los valores de turbidez en relación con la concentración del coagulante, pero indica una mayor remoción de sólidos suspendidos a una concentración de 2000 mg/L  $Al_2(SO_4)_3$  esto se puede evidenciar por medio del cálculo de

porcentajes de remoción para cada experimento como recomienda (Barajas y León, 2015) con la fórmula:

$$\% \text{ Remocion} = \frac{T_i - T_f}{T_i} * 100$$

Donde:

$T_i$ = turbidez inicial

$T_f$ = turbidez final

**Tabla 15.**

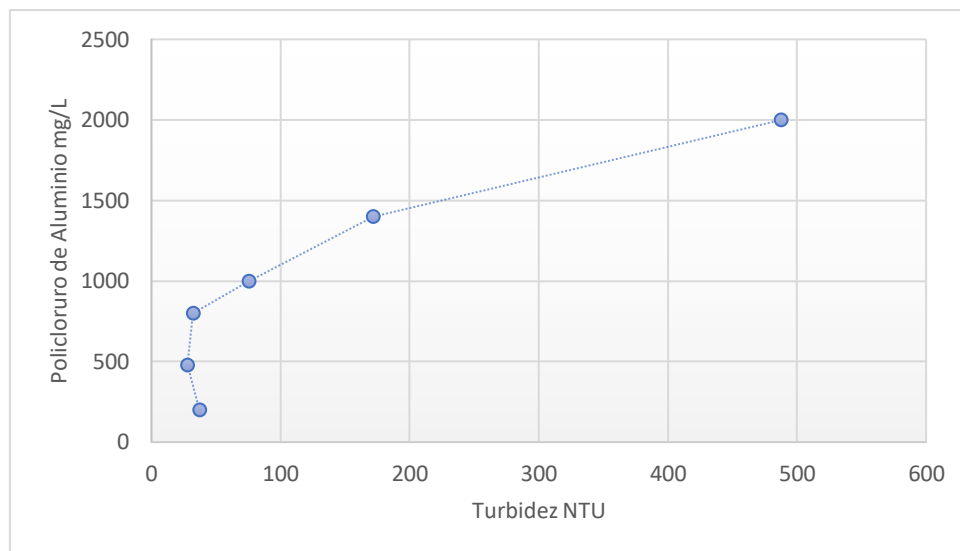
*Determinación del valor óptimo de coagulante: policloruro de Aluminio*

<b>Muestra</b>	<b>PAC</b>	<b>Turbidez</b>
	mg/L	NTU
<b>1</b>	200	37.21
<b>2</b>	480	27.87
<b>3</b>	800	32.35
<b>4</b>	1000	75.51
<b>5</b>	1400	171.9
<b>6</b>	2000	487.9

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 5.**

*Variación de la turbidez con policloruro de aluminio*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

La figura 7 en comparación con la figura 6 muestra una tendencia más lineal entre la concentración de policloruro de aluminio y la disminución de la turbidez.

Después de haber realizado la prueba de jaras con los dos coagulantes y el cálculo de % de remoción se determinó que existe mayor eliminación de sólidos, por tanto, mayor eficiencia con el policloruro de aluminio que con el sulfato de aluminio, 97.93% y 90.67% respectivamente. La eficiencia del 97.93 % se logró al colocar una concentración 480 mg/L PAC lo que se considera satisfactorio para la investigación.

#### **4.2.4. Oxidación avanzada**

##### **4.2.4.1. Fenton.**

A partir de las concentraciones óptimas de fenton para tratar efluentes lácteos encontradas en la bibliografía, se aplica la prueba de jaras para determinar las concentraciones óptimas de fenton para la muestra 5.

#### 4.2.4.1.1. Determinación de la concentración óptima del sulfato de hierro

Se realiza dos pruebas de jaras: a concentraciones de 60, 80, 100, 120, 140 y 160 [mg/L] de  $\text{FeSO}_4$  y se obtuvo mayor eficiencia con la concentración de 80 mg/L, para mejorar la eficiencia se realiza una segunda prueba de jaras, con otras concentraciones cercanas al valor óptimo ya obtenido.

**Tabla 16.**

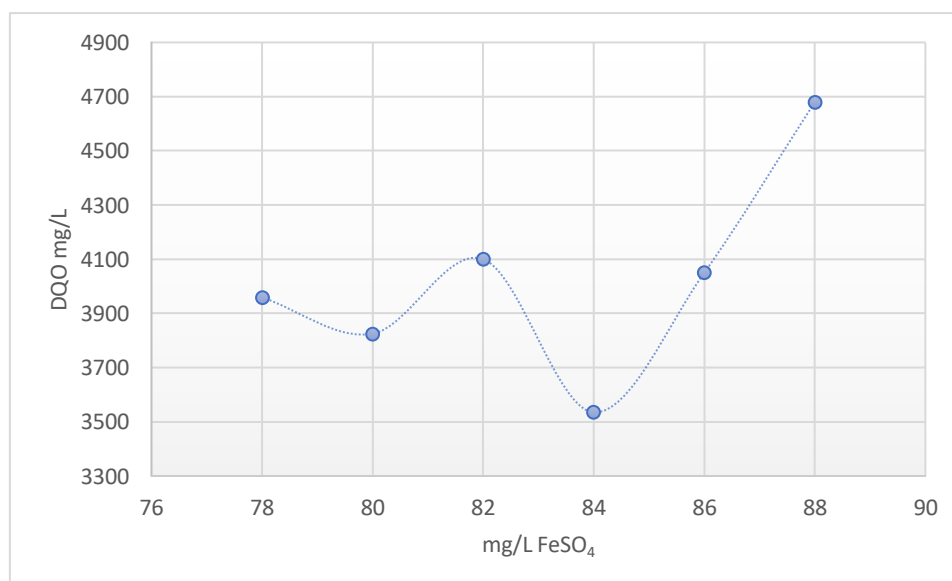
*Disminución de la DQO a distintas concentraciones de  $\text{FeSO}_4$*

Muestra	$\text{FeSO}_4$	$\text{H}_2\text{O}_2$	pH	Turbidez	DQO
	mg/L	mg/L	-	NTU	mg/L
1	78	140	2.77	70.21	3959
2	80	140	2.73	71.65	3825
3	82	140	2.76	66.96	4100
4	84	140	2.78	53.87	3535
5	86	140	2.77	62.65	4050
6	88	140	2.75	62.20	4680

Nota: Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 6.**

*Óptimo de la concentración de  $\text{FeSO}_4$*



Nota: Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).



Se aplica dosificaciones de  $\text{FeSO}_4$  entre 78 y 88 mg/L, bajo una concentración constante de  $\text{H}_2\text{O}_2$  logrando una disminución de la DQO, para el efluente lácteo utilizado en este estudio, se determina que la concentración óptima de  $\text{FeSO}_4$  es de 84 mg/L. El exceso de sulfato de hierro influye en la reacción Fenton, generando concentraciones altas de iones ferrosos no utilizados, lo que no está permitido (RGogate y BPandit, 2004, p. 530).

#### 4.2.4.1.2. *Determinación de la concentración óptima del $\text{H}_2\text{O}_2$ al 30%*

Transformación de mg a microlitros del  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%

$$X \text{ mgH}_2\text{O}_2 \cdot \frac{1g}{1000mg} \cdot \frac{100}{30} \cdot \frac{1cm^3}{1.11g} \cdot 1000 = X_{\mu l}$$

**Tabla 17.**

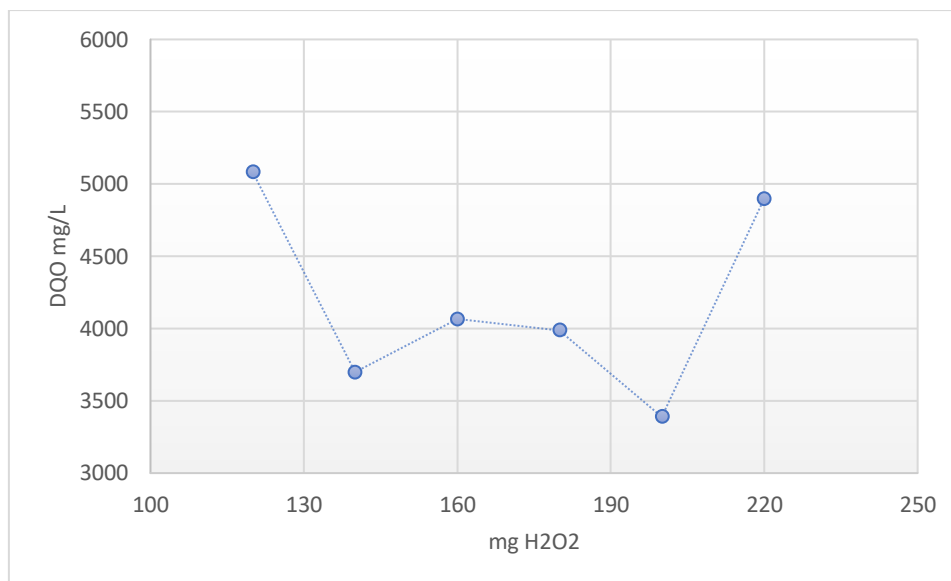
*Disminución de la DQO a distintas concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$*

<b>Muestra</b>	<b><math>\text{FeSO}_4</math></b>	<b><math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez</b>	<b>DQO</b>
	<i>mg</i>	<i>mg</i>	-	<i>NTU</i>	<i>mg/L</i>
<b>1</b>	84	120	2.78	129.8	5081
<b>2</b>	84	140	2.77	118.5	3698
<b>3</b>	84	160	2.75	136.7	4065
<b>4</b>	84	180	2.76	117.8	3987
<b>5</b>	84	200	2.77	122.1	3389
<b>6</b>	84	220	2.73	133.7	4897

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 7.**

*Óptimo de la concentración de  $H_2O_2$*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

Ya obtenida la concentración de hierro, se varía la concentración de  $H_2O_2$ , así mismo se realiza dos pruebas de jaras para encontrar la concentración óptima (IdilArslan y EfeCaglayan, 2006), se observa en la Figura 9 que la concentración de  $H_2O_2$  de 200 mg/L es la que presenta menor valor de DQO; se debe tener en cuenta que el exceso de  $H_2O_2$  en sí mismo actúa como un agente reductor  $HO\bullet$ , disminuyendo así la degradación de compuestos orgánicos (Sivrioğlu y Yonar, 2015, p. 2340).

#### **4.2.4.1.3. Tiempo óptimo de ozono**

**Tabla 18.**

*Tiempo óptimo de aplicación de ozono*

Muestra	Tiempo de O <sub>3</sub>	pH	Turbidez	DQO
	min	-	NTU	
1	15	7	80	15000
2	30	7	100	13984
3	60	7	107	14500
4	120	7	62	13240

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo de O<sub>3</sub></b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez</b>	<b>DQO</b>
<b>5</b>	180	7	100	14650
<b>6</b>	240	7	105	14790

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

Para determinar el tiempo óptimo de ozono en la muestra de agua residual se realiza un control de pH a 7 como recomienda (IdilArslan y EfeCaglayan, 2006), que en pH alcalinos proporciona mayor eficiencia en procesos de ozonización; se determina que el tiempo óptimo para la muestra de agua residual es de 120 min.

#### **4.2.4.1.4.      *Tiempo óptimo de luz UV***

**Tabla 19.**

*Tiempo óptimo de aplicación de luz UV*

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo de UV</b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez</b>	<b>DQO</b>
	<i>min</i>	-	<i>NTU</i>	
<b>1</b>	30	7	100	14001
<b>2</b>	60	7	107	13120
<b>3</b>	90	7	62	13270
<b>4</b>	120	7	100	13650
<b>5</b>	240	7	105	14590

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

La determinación del tiempo óptimo de UV se realizó a diferentes pruebas de oxidación con la luz UV a un pH de 7 como menciona (IdilArslan y EfeCaglayan, 2006, p. 135), que en pH alcalinos proporciona mayor eficiencia en procesos de foto-fenton; en la tabla 19 se observa que el tiempo óptimo de UV a la que se debe someter la muestra es de 60.

### **4.3.      Ensayo 1**

Ya obtenidas las concentraciones óptimas para los procesos de coagulación-floculación, reacción frentón, ozonificación y UV; se realiza un ensayo completo a la muestra, el mismo que consta primero de un proceso de sedimentación en conos Imhoff, posterior a esto se realiza

el proceso de floculación-coagulación con la concentración óptima, se deja reposar la muestra por 60 minutos se filtra la muestra y se realiza la reacción Fenton a un pH de 2.8 (Almeida et al, 2014), se deja actuar la reacción por 60 minutos y posterior a esto se realiza un tratamiento biológico, finalmente después de 5 días de tratamiento se realiza la ozonificación y el tratamiento con UV obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 20.**

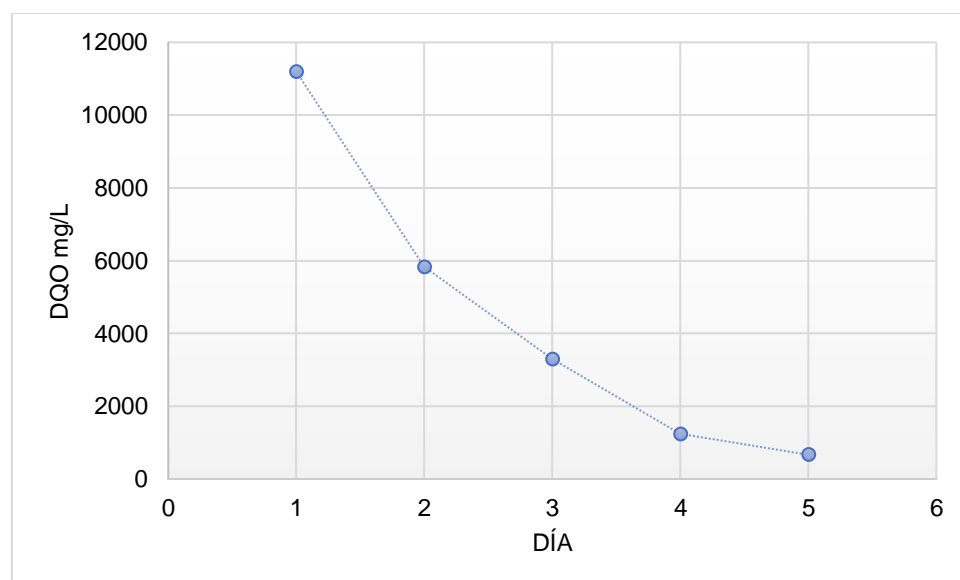
*Variación de la DQO en el tratamiento biológico en el ensayo 1*

DIA	pH	DQO	Lodo
	-	mg/L	mL
<b>1</b>	6.5	11195	63
<b>2</b>	6.3	5834	44
<b>3</b>	6.8	3297	37
<b>4</b>	6.6	1235	30
<b>5</b>	6.8	666	24

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 8.**

*Disminución de la DQO respecto al tiempo de aplicación de lodos en el ensayo 1*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

En la Tabla 21 se evalúa la disminución de la DQO con respecto al tiempo en el tratamiento biológico, la combinación de procesos como reacción Fenton y tratamiento biológico, a pesar de presentar una gran eficiencia no se logra llegar a la norma establecida por la autoridad ambiental que es de 500 DQO establecida en el acuerdo ministerial 097-A, por ello se aplica otros procesos como ozonificación y UV que ayudan a disminuir el valor de DQO.

**Tabla 21.**

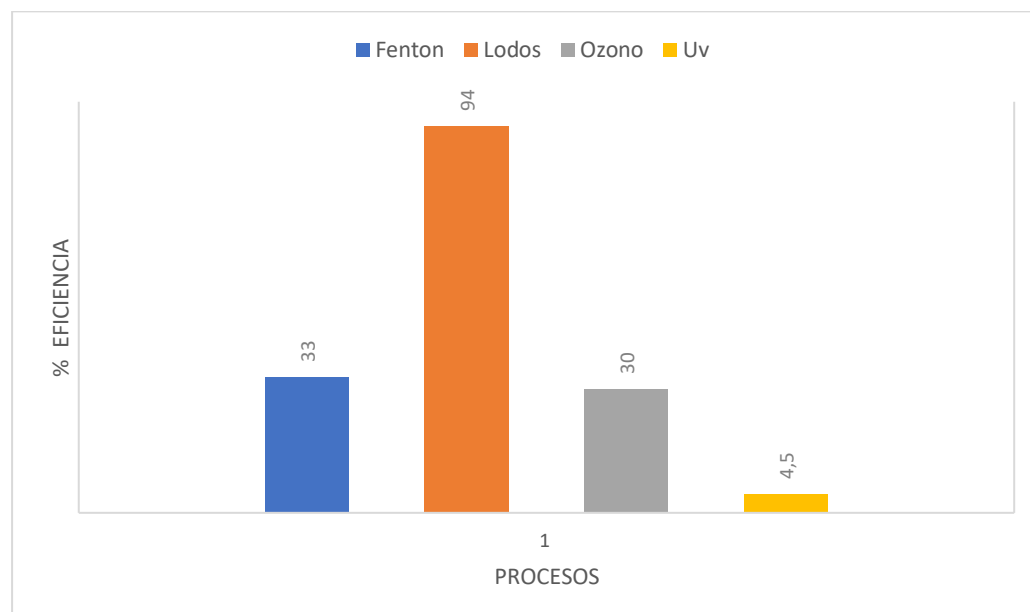
*Disminución de la DQO en el ensayo 1*

Proceso	DQO inicial <i>mg/l</i>	DQO final <i>mg/l</i>	Eficiencia %
<b>Fenton</b>	16800	11195	33
<b>Lodos activos</b>	11995	666	94
<b>Ozono</b>	666	469	30
<b>UV</b>	469	448	4.5

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 9.**

*Eficiencia de los procesos en el ensayo 1*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

En el ensayo 1, se obtuvo un 33 % de eficiencia en la disminución de la DQO con la reacción fenton se elimina los contaminantes más complejos como sólidos volátiles que pueda tener la muestra para pasar al tratamiento biológico. La mayor eficiencia se obtiene en el tratamiento biológico con un 94% de remoción, debido a que el agua residual presenta un alto índice de biodegradabilidad y los tratamientos biológicos resultan ser los más adecuados para su tratamiento (Sánchez y García, 2018) finalmente al realizar un proceso de ozonificación y UV se logra cumplir con los valores establecidos dentro de la normativa ambiental vigente Acuerdo Ministerial 097 A que es menor a 500 mg/L de DQO, pudiendo calcular la % de remoción total de todo el ensayo con la formula (Barajas y León, 2015) el mismo que es del 97%.

$$\% \text{ Remocion} = \frac{16800-469}{16800} * 100$$

## Ensayo 2

Para el ensayo dos se realiza primero un tratamiento anaerobio por 5 días, el mismo consiste en dejar reposar la muestra y diariamente sacar los gases que se generan en el tratamiento anaerobio mediante una trampa de presión, después de esto se realiza un tratamiento biológico con lodos activos para finalmente aplicar los procesos de oxidación avanzada obteniendo una eficiencia mayor que el ensayo número 1. Los resultados se expresan a continuación:

**Tabla 22.**

*Variación de la DQO en el tratamiento biológico en el ensayo 2*

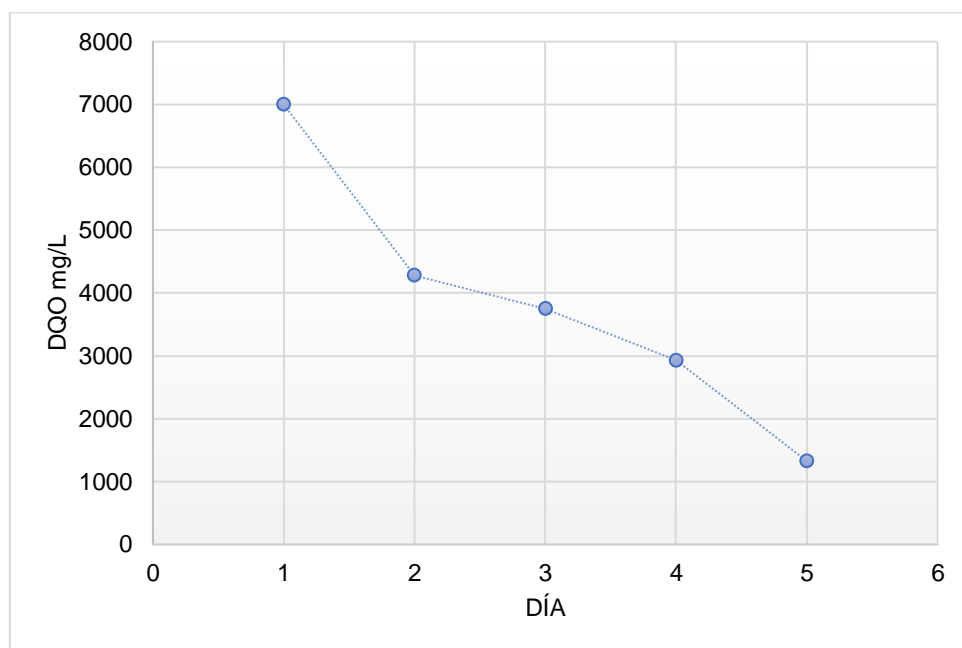
<b>DIA</b>	<b>pH</b>	<b>DQO</b>	<b>Lodo</b>
	<b>-</b>	<b>mg/L</b>	<b>mL</b>
<b>DIA</b>	<b>pH</b>	<b>DQO</b>	<b>Lodo</b>
1	6.5	7000	58
2	6.7	4283	53
3	7	3750	47

DIA	pH	DQO mg/L	Lodo mL
4	7.2	2930	36
5	7.1	1327	28

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 10.**

*Disminución de la DQO respecto al tiempo de aplicación de lodos en el ensayo 2*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Tabla 23.**

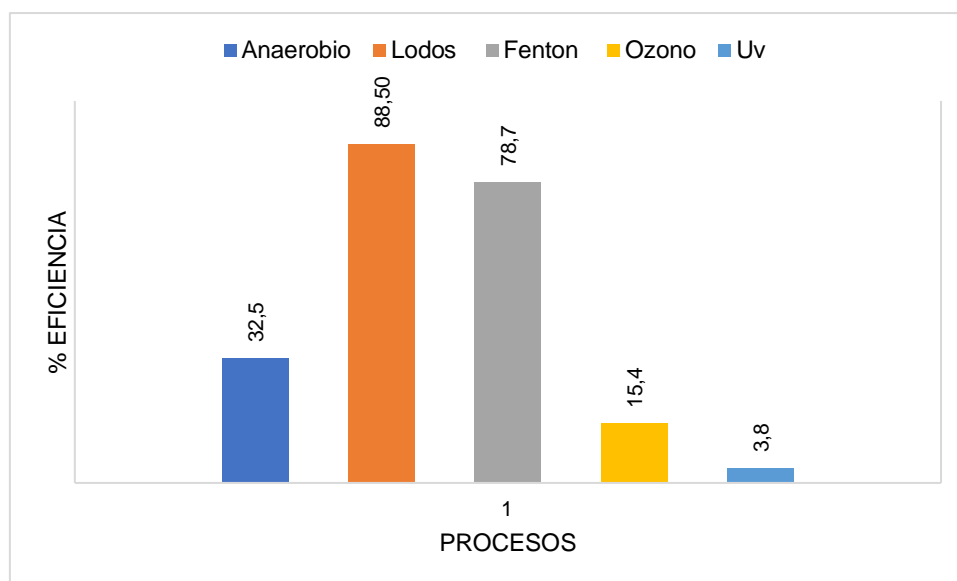
*Disminución de la DQO en el ensayo 2*

Proceso	DQO inicial mg/l	DQO final mg/l	Eficiencia %
Anaerobio	16800	11334	32.5
Lodos activos	11334	1307	88.5
Fenton	1307	279	78.7
Ozono	279	236	15.4
UV	236	227	3.8

*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

**Figura 11.**

*Eficiencia de los procesos en el ensayo 2*



*Nota:* Fuente: Elaborado por Agama y Carrera, (2021).

En el ensayo 2 se aplicó un tratamiento anaerobio y se cambió el orden de los procesos a diferencia del ensayo 1, como se observa en la figura 13 el tratamiento anaerobio tiene un % de remoción del 32.5 % donde grupos específicos de bacterias en ausencia del oxígeno se encargan de transformar la materia orgánica en una mezcla de gases  $\text{CO}_2$  y  $\text{C}_4\text{H}_4$  (Vivanco, Yaya, y Chamy, 2014) convirtiendo así la carga orgánica en biogás; luego se realizó un tratamiento de lodos por el alto índice de biodegradabilidad que presenta el agua residual obteniendo una eficiencia del 88.5% de remoción, seguido se realizó la reacción fenton misma que presenta mayor eficiencia que en el ensayo 1, debido orden que se realiza los procesos al disminuir la carga orgánica del agua residual con los procesos anteriores, la liberación de radicales  $\text{OH} \cdot$  para la oxidación resulta más eficiente la reacción fenton (CYTED, 2010), se logra cumplir con los valores establecidos dentro de la normativa ambiental vigente, pudiendo calcular la eficiencia de cada uno de los procesos mediante la fórmula % de remoción (Barajas y León, 2015), teniendo como eficiencia total del tratamiento el 99%.



#### **4.4. Comprobación del ensayo**

Se realiza la comprobación del ensayo número dos que presenta mayor eficiencia en el tratamiento del efluente, en un agua sintética con parámetros similares al de la muestra; aplicando la metodología del ensayo número 2 se obtuvo una DQO 316 mg/L comprobando la valides del ensayo en la disminución de la DQO para llegar al a norma establecida Acuerdo Ministerial 097A

#### **4.5. Discusión**

La interpretación de los valores de eficiencia de la Tabla 21 y 23 demuestran que la reducción de la DQO con PAO's, en el ensayo 1 y 2 tiene una eficiencia de 97% y 99% respectivamente, lo que indica una buena eficiencia en el tratamiento de efluentes lácteos. Según (Almeida, y otros, 2014) recomienda una eficiencia mínima del 80% aplicando tratamiento a las aguas residuales de origen lácteo. En conjunto con los tratamientos aplicados en el ensayo 1 y 2 se cumple con el límite máximo permisible de DQO expresados en el TULSMA.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Se determinó que las tasas óptimas fenton, ozonificación y Uv a escala de laboratorio aplicadas en PAO's para el tratamiento de efluentes lácteos es de 84mg/L  $\text{FeSO}_4$  y 200mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  para la reacción Fenton, 120min para ozonificación y 60 min para UV, mismas que al combinar con un proceso biológico ayuda a disminuir la carga contaminante cumpliendo así con la normativa ambiental vigente.

Se estableció que la mayor eficiencia para tratar el efluente es el ensayo número dos que inicia con un tratamiento anaerobio el cual tiene una eficiencia del 32.5%, seguido de un tratamiento biológico con una eficiencia de 88.5% para finalmente aplicar los PAO's con una eficiencia del 82.6%, la eficiencia total del ensayo es del 98.6%, logrando disminuir la DQO inicial de 16800mg/L a 229 mg/L.

Al realizar el tratamiento biológico con lodos activados, con aireación durante 24 horas por 5 días en el ensayo 1 y 2 presentan una eficiencia de 94% y 88.5% respectivamente; debido a que la relación de  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  es igual a 0.6 indicando un alto índice de biodegradabilidad del agua residual.

Los PAO's al ser procesos fisicoquímicos altamente eficientes tienen un alto costo para su implementación a diferencia de un proceso convencional que es más económico, no obstante, algunas industrias requieren de la combinación de procesos para cumplir con la normativa ambiental vigente.

### **5.2 Recomendaciones**

Separar los diferentes efluentes que generan los procesos de elaboración de productos lácteos, con el fin de menorar la carga contaminante en el efluente final y disminuir costos de tratamiento.

Se recomienda tener un especial cuidado en el control y ajuste del pH en diferentes etapas que se lleva a cabo en el laboratorio, porque todos los procedimientos requieren un pH óptimo para lograr una mayor eficiencia, por lo tanto, el pH es un factor influyente en el tratamiento de aguas residuales.

Se recomienda realizar el análisis de biodegradabilidad para determinar el orden y tipo de tratamiento, también análisis de parámetros significativos COT, DBO, DQO al final de cada etapa para comprobar la correcta depuración del efluente.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- AGACE. (2018). *Manual de mustreo de aguas*. Obtenido de Muestreo de aguas: [http://www.cegesti.org/agace/presentaciones/08\\_manual\\_aguas\\_muestreo\\_de\\_aguas.pdf](http://www.cegesti.org/agace/presentaciones/08_manual_aguas_muestreo_de_aguas.pdf)
- Almeida, C. L., Samanamud, G. R., Freitas, A. P., Oliveira, I. S., Freitas, L. V., y Almeida, C. R. (2014). The use of Advanced Oxidation Processes (AOPs) in dairy effluent treatment . *Science Publishing Gruop*, 44. doi:10.1.1.1029.9563&
- Basantes, L., y García, K. (10 de marzo de 2020). *Tratamiento de efluentes líquidos provenientes de postcosecha de florícolas mediante oxidación avanzada*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18604/1/UPS%20-%20ST003303.pdf>
- Brião, V., y Tavares, C. G. (2007). Effluent generation by the dairy industry: preventive attitudes and opportunities. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 488. doi:<https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000400003>
- Carpio, A. S. (Diciembre de 2010). *Caracterización del consumo de agua de la planta de lácteos, Zamorano*. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/551/1/IAD-2010-T022.pdf>
- Chambers, B. (09 de marzo de 2005). *El Universo*. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/2005/03/09/0001/9/B7DA6D1F1A60493985AD945EBCA6C5DD.html/>
- Condorchem Envitech. (24 de mayo de 2021). *Tratamiento de aguas residuales de la Industria láctea*. Obtenido de Introducción: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-industria-lactea/#>

- CYTED. (2010). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Obtenido de [http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidaciones\\_avanzadas\\_0.pdf](http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf)
- El Telégrafo. (29 de junio de 2019). *El Telégrafo*. Obtenido de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/industria-lactea-ingresos-ecuador#:~:text=Cerca%20de%205'200.000%20litros,50%25%20va%20al%20merca do%20formal>.
- Grisales, D., Ortega, J., y Rodríguez, T. (1 de diciembre de 2011). *Removal of organic matter and toxicity in hospital wastewaters by ozone*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v79n173/a13v79n173.pdf>
- IdilArslan-Alaton, y EfeCaglayan, A. (2006). Toxicity and biodegradability assessment of raw and ozonated procaine penicillin G formulation effluent. *ELSEVIER*, 131-140. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.02.014>
- Llanos, D. (2013). *Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria de productos lácteos "Pillaro" ubicada en el Cantón Pillaro-Tungurahua*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2636/1/236T0068.pdf>
- Menéndez, A. (23 de Junio de 2018). *Reducción de la demanda química de oxígeno en lactosueros mediante el proceso Fenton*. Obtenido de [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7544/Men%C3%A9ndez\\_Escarrena\\_Alfredo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7544/Men%C3%A9ndez_Escarrena_Alfredo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluente*. Obtenido de <http://www.industrias.ec/archivos/CIG/file/CARTELERA/Reforma Anexo 28 feb 2014 FINAL.pdf>

- Molina, M. (mayo de 2015). *Propuesta de tratamiento de aguas residuales en industria láctea*.  
Obtenido de Métodos de caudal y muestreo:  
<https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4871/1/120897.pdf>
- Monge, S., Silva, A., y Bengoa, C. (2009). Obtenido de  
[http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidaciones\\_avanzadas\\_0.pdf](http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf)
- Prado, D. (2013). *Valoración de impactos ambientales generados en la industria láctea y cárnica en la ciudad de Cuenca*. Obtenido de  
<http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3265/1/10039.pdf>
- Real, L. (14 de abril de 2013). Industria láctea con mejores condiciones de producción. *Gestión*(226), 36-39. Obtenido de  
[https://revistagestion.ec/sites/default/files/import/legacy\\_pdfs/226\\_004.pdf](https://revistagestion.ec/sites/default/files/import/legacy_pdfs/226_004.pdf)
- Real, L. (2013). *Industria láctea con mejores condiciones de producción* . Obtenido de  
[https://revistagestion.ec/sites/default/files/import/legacy\\_pdfs/226\\_004.pdf](https://revistagestion.ec/sites/default/files/import/legacy_pdfs/226_004.pdf)
- REMTAVARES. (16 de Enero de 2008). *Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento*. Obtenido de  
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477>
- RGogate, P., y BPandit, A. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *ELSEVIER*, 501-540.  
Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7)
- Romero, A. (2002). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Romero, M. (Noviembre de 2009). *Desarrollo de un plan de manejo ambiental para la industria procesadora de leche "FLORAP"*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1671/1/CD-2601.pdf>
- Ruiz, P. (2006). *La importancia de la producción de leche en el Ecuador*. Obtenido de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/catalog/resGet.php?resId=23385#:~:text=La%20pro%2D%20ducci%C3%B3n%20en%20la,22%25%20de%20la%20producci%C3%B3n%20nacional.>
- Salou, T. (Mayo de 2016). *Environmental impacts of dairy system intensification: the functional unit matters*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.019>
- Sánchez, R., y García, K. (1 de marzo de 2018). Tratamiento de aguas residuales de cargas. *La Granja*, 9. Obtenido de <http://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.08>
- Sivrioğlu, Ö., y Yonar, T. (2015). Determination of the acute toxicities of physicochemical pretreatment and advanced oxidation processes applied to dairy effluents on activated sludge. *ELSEVIER*, 2337-2344.
- Soares, B., Quitério, S., y Vendramel, S. (15 de febrero de 2021). *Tratamiento de efluentes en la industria láctea*. Obtenido de <https://portalechero.com/tratamiento-de-efluentes-en-la-industria-lactea/>
- Soque, A. (mayo de 2019). *Evaluación bacteriológica de leche cruda, sometida a tres concentraciones de ozono, mediante su comprobación microbiológica en placas petrifilm*. Obtenido de <http://200.12.169.19/bitstream/25000/18587/1/T-UCE-0014-MVE-046.pdf>
- Tikariha, A., y Sahu, O. (17 de Junio de 2014). *Study of Characteristics and Treatments of Dairy Industry Waste Water*. doi:10.12691/jaem-2-1-4

Vallejo, R. E. (noviembre de 2017). *Evaluación de la eficacia de la oxidación avanzada para la descontaminación de efluentes con ibuprofeno y paracetamol a escala de laboratorio.* Obtenido de

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14901/1/UPS%20-%20ST003291.pdf>

Veliz, E., Llanes, J., Fernández, L., y Bataller, M. (febrero de 2016). *Coagulation-Flocculation, Filtration and Ozonation of Wastewater for Reuse in Crop Irrigation.* Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000100017](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100017)

Villa, R. (2007). *Potencial de aplicação do processo foto-fenton/solar como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios.* Obtenido de [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000800002&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000800002&script=sci_abstract&tlng=pt)



## 7. ANEXOS

**Anexo 1.** Resultados obtenidos de las muestras analizadas en laboratorio de coliformes totales y fecales



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANA**  
ECUADOR



**SALESIANOS  
CON VISION**

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA**

**Cliente:** BRAYAN ENRIQUE CARRERA MARTINEZ

**Dirección:** Solanda, Quito

**Contacto:** Brayan Carrera

**Cantidad de muestras:** 1

**Fecha de ingreso:** julio 5, 2021

**Matriz:** líquida

**Teléfono:** (+593) 99 555 3622

**E-mail:** bioagro@ups.edu.ec

**N° de Informe:** 21 388

**Fecha Emisión:** julio 8, 2021

**Fecha de Análisis:** julio 5 al 8, 2021

**INFORME DE RESULTADOS**

Identificación de Usuario	Unidad	SUERO DE LECHE	MÉTODO DE VALORACIÓN
Código de laboratorio		ISA21.577	
Parámetros			
Coliformes Totales	uvg/100ml	++	904 92210
Coliformes Fecales	uvg/100ml	++	904 92210

**DATOS ADICIONALES:**

uvg/100ml: unidades formadoras de colonias cada cien mililitros de muestra.

SME: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23a Edition, 2017 -AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION "APHA".

**Observaciones:**

Los resultados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) entregada(s) por el CLIENTE.



Ing. Agr. Orlando Guillavisi  
Técnico de Suelos y Agua



**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA**

Cayambe, Av. Natalia Jarrín N3-85 y 9 de Octubre. Teléfonos: 593 (2) 3962946 / 3962800 ext. 2504-2534.  
Correo electrónico: agualavisi@ups.edu.ec / bioagrolab@ups.edu.ec

## Anexo 2. Resultados obtenidos de las muestras analizadas en laboratorio de nitrógeno total



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANA**  
ECUADOR



**SALESIANOS**  
DIGN. BONICE

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA**

Pág. 1 de 1

**Cliente:** BRAYAN ENRIQUE CARRERA MARTÍNEZ

**Dirección:** Solanda, Quito

**Contacto:** Brayan Carrera

**Cantidad de muestras:** 1

**Fecha de ingreso:** julio 5, 2021

**Matriz:** líquida

**Tel/Cel:** (+593) 99 355 3622

**Email:** brayanec@ups.edu.ec

**N° de Informe:** 21 389

**Fecha Emisión:** julio 8, 2021

**Fecha de Análisis:** julio 5 al 8, 2021

**INFORME DE RESULTADOS**

Identificación de Usuario	Unidad	MÉTODO DE VALORACIÓN
Código de laboratorio <b>Parámetros</b>	L5A21-577	
Nitrógeno Total	%	0.02

**DATOS ADICIONALES:**

mg/L: miligramos por litro; %: porcentaje; N.A.: no aplica; \*: fuera del rango detectable S.A.

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 22<sup>a</sup> Edición, 2012 -AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION "APHA".

**Observaciones:**

Los resultados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) entregada(s) por el CLIENTE.



Ing. Adrián Orlando Guzmán  
Técnico de Suelos y Agua



**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA**

Cayambe, Av. Natalia Jarín N3-85 y 9 de Octubre. Teléfonos: 593 (0) 3962946 / 3962800 ext. 2504-2534.  
Correo electrónico: agualavisio@ups.edu.ec / bioagrolab@ups.edu.ec

**Anexo 3.** Fotografías tomadas en el laboratorio durante la realización de los POA's



**Figura 13.** Medición de la  $DBO_5$ , los frascos Winkler están en la incubadora a 20.2 °C



**Figura 12.** Medición de la DQO en el ensayo 2



**Figura 14.** Tratamiento biológico con lodos



**Figura 15.** Prueba de jarras para determinar el valor óptimo de  $FeSO_4$  y  $H_2O_2$



**Figura 17.** Proceso de ozonización en la muestra de agua residual láctea

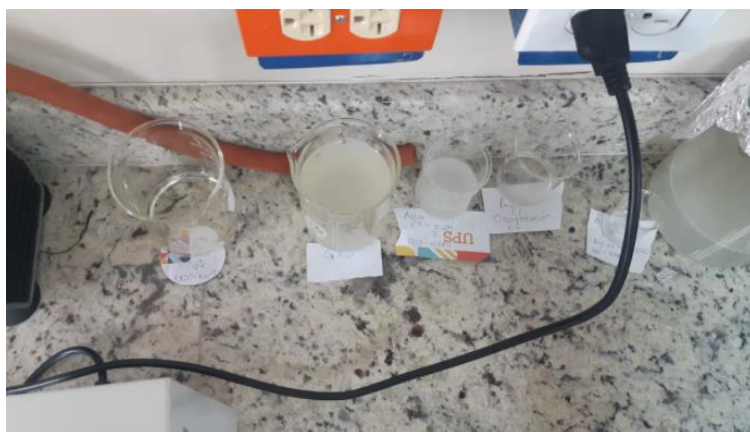


**Figura 16.** Proceso de filtración con bomba al vacío para reducir sólidos

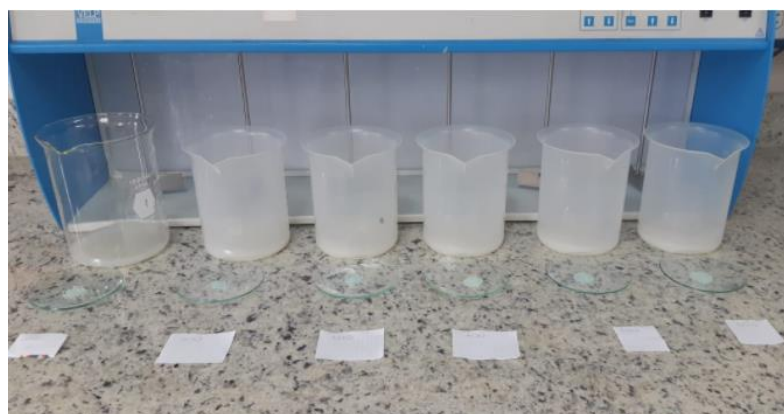




**Figura 19.** Sedimentación de los flóculos después de realizar una prueba de jarras para determinar el valor óptimo del coagulante



**Figura 18.** Muestras preparadas para aplicar luz UV



**Figura 20.** Prueba de jarras para determinar los valores óptimos de los reactivos utilizados en Fenton



**Figura 21.** Proceso de ozonización



**Figura 22.** Medición de las concentraciones del  $\text{FeSO}_4$



**Figura 23.** Medición de detergentes en la muestra de agua residual

